



**Filipe Manuel Almeida
Neves**

**Comunicação entre Veículos – Testes de
Comunicações Reais**



**Filipe Manuel Almeida
Neves**

**Comunicação entre Veículos – Testes de
Comunicações Reais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica da Dra. Susana Sargento, Professora auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Dr. Victor Marques, Engenheiro da Portugal Telecom Inovação.

Dedico este trabalho aos meus Pais, Irmão e Namorada pelo incansável apoio.

O júri

Presidente

Prof. Dr. José Carlos da Silva Neves

Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Dra. Ana Cristina Costa Aguiar

Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Arguente Principal)

Prof. Dra. Susana Isabel Barreto de Miranda Sargento

Professora Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (Orientadora)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus Pais por me possibilitarem um curso superior, assim como o apoio incondicional durante estes 5 anos árduos, que constituíram uma grande etapa da minha vida.

Agradeço à minha Namorada o apoio nos dias difíceis, toda a sua compreensão, carinho, afecto, motivação, paciência e acompanhamento ao longo do curso.

Agradeço a todos os colaboradores do Instituto de Telecomunicações que me ajudaram no desenvolvimento desta Dissertação, em especial ao Ricardo Moreira pela ajuda prestada ao longo de todo o ano e pela quantidade de conceitos fundamentais que aprendi num curto espaço de tempo. Sem ele teria tido dificuldades adicionais.

Agradeço a todos os meus amigos por estarem presentes nos bons e nos maus momentos, em especial ao Luís Coelho por terminarmos uma etapa de 18 anos seguidos de companheirismo e de grande amizade. Gostaria de destacar aqui também a amizade e a ajuda prestada pelo Tomé Gomes.

Agradeço também a colaboração da equipa do projecto CAMBADA pela disponibilização de baterias, que sem elas teria sido impossível concretizar grande parte dos testes realizados nesta Dissertação.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à Professora Susana Sargento por toda a orientação, motivação, dedicação e disponibilidade prestada durante este ano. Agradeço, também, aos meus colaboradores André Cardote e André Reis por me ajudarem sempre a escolher o melhor caminho e sempre prontos para discutirem comigo os problemas/resultados obtidos.

Palavras-chave

VANET, comunicação veículo-a-veículo, alcance, propagação, experiências em mundo real, redes veiculares, norma IEEE 802.11p, Ad hoc, transmissão de vídeo.

Resumo

Com o crescente interesse nas potencialidades da comunicação entre veículos, muitos trabalhos foram desenvolvidos de forma a testar-se quais as potencialidades das Vehicular Ad-hoc NETworks (VANETs), bem como estudar possíveis soluções para problemas que possam existir. Portanto, é importante conhecer as suas limitações, de modo a que seja possível verificar de que forma estas poderão ajudar e melhorar a experiência dos utilizadores e a eficiência global das comunicações veículo-veículo e veículo-estrada. No entanto, a maioria dos trabalhos desenvolvidos foram realizados com poucos veículos ou sem a utilização da norma IEEE 802.11p (específica das redes veiculares).

O projecto DRIVE-IN surge para colmatar os problemas referidos anteriormente, distinguindo-se dos trabalhos já realizados por pretender criar uma *testbed* em escala real na cidade do Porto, com cerca de 465 táxis, utilizando, para tal, a norma IEEE 802.11p.

O presente trabalho propõe-se a estudar e a avaliar o desempenho das redes veiculares em situações do mundo real. Este documento é composto pelo desenvolvimento do *software* necessário à realização dos vários cenários e, numa fase posterior, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, assim como são apresentadas as conclusões de todo o trabalho elaborado.

Os cenários incluídos incorporam situações de linha de vista (alcance máximo e desempenho da transmissão em velocidades relativas), situações sem linha de vista (intersecções), bem como alguns testes de situações mais específicas, como é o caso do desempenho das comunicações em túneis ou em viadutos. Por fim, avaliam-se as possíveis melhorias das comunicações com a instalação de infra-estruturas ao longo das estradas e testam-se as potencialidades destas redes para serviços mais exigentes, como a transmissão de vídeo.

Através dos resultados obtidos verificou-se que os veículos com linha de vista podem ter comunicação a uma distância de 1km, enquanto que, sem linha de vista, o alcance das comunicações diminuiu para a ordem das centenas de metros (suficiente para permitir comunicações de segurança e de cooperação numa aproximação a um cruzamento). Observou-se também que a transmissão entre veículos a diferentes velocidades relativas não diminui o desempenho (até 100 km/h). Além disso, verificou-se que era possível haver uma boa comunicação nos viadutos, e que as comunicações dentro dos túneis analisados têm ainda um melhor desempenho do que comunicações em linha de vista. Por fim, concluiu-se que a transmissão de vídeo é possível e com atrasos desprezáveis e que, de facto, a existência de infra-estruturas nas estradas, ligadas entre si, melhoram significativamente as comunicações entre os veículos.

Keywords

VANET, vehicle-to-vehicle communication, range, propagation, real-world experiments, vehicular network, IEEE 802.11p standard, Ad hoc, streaming video.

Abstract

With the growing interest of the potential of communication between vehicles, several studies have been developed to evaluate the potentials of Vehicular Ad-hoc NETWORKS (VANETs) and study possible solutions to problems that may exist. Therefore, it is important to know their limitations in order to verify how vehicular networks can help to improve the user experience and overall efficiency of the communications of vehicles and road. However, most of the works developed were done with few vehicles or without a fully-compliant version of the IEEE standard 802.11p.

The DRIVE-IN project appears to address the problems mentioned above. It differs from the work already done by planning a large-scale testbed in Porto, with about 465 taxis, using IEEE standard 802.11p.

This document proposes the evaluation of the performance of vehicular networks in real-world situations. This Dissertation starts by explaining the software necessary to achieve the results of the various scenarios and, at a later stage, the results obtained are shown and discussed and a conclusion of all the work is made.

The scenarios included comprise situations of line-of-sight (maximum range and performance at relative velocities), non-line-of-sight (intersections) and tests in specific situations (performance of communications in tunnels and in viaducts). Finally, we assessed the improvement in communications created by placing infrastructure points along the roads and tested the potential of networks for more stringent services, such as streaming video.

Through the results obtained it was verified that, in vehicles with line-of-sight, the communication range can reach values larger than 1km, whereas in no-line-of-sight scenarios the communication range decreased to values in the order of hundred meters (in urban scenarios, these values are sufficient to enable the control communication and cooperation between vehicles approaching the intersection). It was also observed that the transmission between vehicles at different speeds does not reduce the performance (up to 100 km/h). Moreover, it was shown that it is possible to have a good communication in viaducts, and that communications in considered tunnels have a better performance than line-of-sight communications. Finally, it was concluded that the video can be transmitted with negligible delays and the existence of inter-connected infrastructures along the roads significantly enhance communications between vehicles.

Índice

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE ACRÓNIMOS	VII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 ENQUADRAMENTO	2
1.2.1 PROJECTO DRIVE-IN	2
1.3 OBJECTIVOS.....	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	6
2. ESTADO DE ARTE DAS REDES VEICULARES	7
2.1 DEFINIÇÃO	8
2.1.1 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS.....	8
2.1.2 DESAFIOS	9
2.2 CONCEITOS.....	10
2.2.1 EQUIPAMENTO BÁSICO	10
2.2.2 NORMAS	10
2.2.3 ENDEREÇAMENTO	12
2.3 PROPAGAÇÃO DE DADOS E ROTAS.....	13
2.3.1 PROPAGAÇÃO DE DADOS.....	13
2.3.2 PROTOCOLOS DE ENCAMINHAMENTO	17
2.3.2.1 AODV	19
2.3.2.2 OLSR.....	19
2.4 POTENCIAIS APLICAÇÕES E SERVIÇOS	22
2.4.1 APLICAÇÕES DE SEGURANÇA	22
2.4.1.1 AVISO DE ANTI-COLISÃO	22
2.4.1.2 MENSAGEM DE AVISO DE EMERGÊNCIA.....	23
2.4.1.2.1 EWM INSTANTÂNEA	23
2.4.1.2.2 EWM PERMANENTE	24
2.4.2 GESTÃO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO	25
2.4.2.1 MONITORIZAÇÃO DE TRÁFEGO	25
2.4.2.2 ASSISTÊNCIA EM INTERSECÇÕES	26
2.4.3 CONFORTO	26
2.4.4 ULTRAPASSAGENS INTELIGENTES.....	27
2.4.5 LOCALIZAÇÃO DE VEÍCULOS	27
2.5 SEGURANÇA NA REDE.....	27

2.6	MODELOS TEÓRICOS PARA REDES VEICULARES	28
2.6.1	LINHA DE VISTA.....	28
2.6.1.1	FÓRMULA DE FRIIS.....	29
2.6.1.2	MODELOS TWO-RAY E FREE-SPACE	30
2.7	TESTBEDS E PROJECTOS RELACIONADOS.....	31
2.7.1	TESTBEDS	31
2.7.2	PROJECTOS RELACIONADOS.....	32
2.8	SUMÁRIO	33
3.	DESENVOLVIMENTO PARA SUPORTE DA TESTBED EXPERIMENTAL	35
3.1	EQUIPAMENTO UTILIZADO	35
3.2	POTÊNCIAS DE SAÍDA E NORMA IEEE 802.11P	37
3.3	APLICAÇÕES E IMPLEMENTAÇÕES	40
3.3.1	RECOLHA DE INFORMAÇÃO	40
3.3.1.1	BUFFER.....	43
3.3.2	ANÁLISE DA INFORMAÇÃO	44
3.3.2.1	VISUALIZAÇÃO DOS DADOS NO GOOGLE EARTH	46
3.3.3	TRANSMISSÃO DE VÍDEO - ANÁLISE	46
3.3.3.1	VLC.....	47
3.3.3.2	GSTREAMER.....	48
3.3.4	SINCRONIZAÇÃO DE RELÓGIOS	49
3.4	DESAFIOS	49
3.4.1	ANTENAS EXTERIORES / INTERIORES.....	49
3.4.2	DIRECCIONALIDADE DAS ANTENAS	50
3.5	SUMÁRIO	50
4.	EXPERIÊNCIAS EM CENÁRIOS REAIS	51
4.1	TESTES INICIAIS	52
4.1.1	TEMPOS DE ASSOCIAÇÃO	52
4.1.2	TAXAS DE TRANSMISSÃO E ATRASO <i>MULTIHOP</i>	54
4.2	ALCANCE MÁXIMO COM LINHA DE VISTA	56
4.3	DESEMPENHO A VELOCIDADES RELATIVAS COM LINHA DE VISTA	58
4.4	CRUZAMENTOS SEM LINHA DE VISTA	60
4.5	TÚNEIS.....	64
4.6	VIADUTOS.....	67
4.7	TRANSMISSÃO DE VÍDEO.....	68
4.8	DESEMPENHO DAS REDES VEICULARES COM E SEM INFRA-ESTRUTURAS	71
4.9	CONCLUSÕES	78
5.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	79
	BIBLIOGRAFIA	83

Lista de Figuras

FIGURA 1 – SISTEMAS DE TRANSPORTES INTELIGENTES (FONTE: [14])	7
FIGURA 2 – PROPOSTA DE ESPECTRO PARA APLICAÇÕES DE SEGURANÇA E EFICIÊNCIA DO TRÁFEGO NA EUROPA (FONTE: [20])...	11
FIGURA 3 – PROPAGAÇÃO DE DADOS [17]	14
FIGURA 4 – REDE VEICULAR BASEADA NUMA COMUNICAÇÃO VEHICLE-TO-ROAD (FONTE: [39])	15
FIGURA 5 – SERVIÇOS DE COMUNICAÇÕES SEM FIOS ORIENTADAS AO PASSAGEIRO (FONTE: [40])	15
FIGURA 6 – GEOCASTING PERMANENTE [17]	24
FIGURA 7 – ESQUEMÁTICO FÓRMULA DE FRIIS.....	29
FIGURA 8 – MÓDULO WI-FI COM NORMA 802.11p/DSRC (FONTE: [100]).....	35
FIGURA 9 – PLACA PARA USO VEICULAR	36
FIGURA 10 – DESCRIÇÃO DOS CONECTORES DISPONÍVEIS.....	36
FIGURA 11 – TOYOTA AURIS (À ESQUERDA) E KIA CEE'D SCOUPE' (À DIREITA) (FONTE: [105] - ADAPTADO).....	37
FIGURA 12 – EQUIPAMENTO INSTALADO NO VEÍCULO	37
FIGURA 13 – RSUs	37
FIGURA 14 – CANAL DE 10MHZ	39
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE BLOCOS: RECOLHA DE INFORMAÇÃO	43
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE BLOCOS: ANÁLISE DA INFORMAÇÃO	45
FIGURA 17 – REGISTOS APLICADOS NO GOOGLE EARTH	46
FIGURA 18 – EXEMPLO DE ANÁLISE DE EMISSÃO DE VÍDEO DO WIRESHARK	47
FIGURA 19 – TEMPO DE ASSOCIAÇÃO	53
FIGURA 20 – TEMPO DE ASSOCIAÇÃO COM PING	53
FIGURA 21 – ESQUEMÁTICO PARA MEDIÇÃO DA TAXA DE TRANSMISSÃO	54
FIGURA 22 – CENÁRIO PARA COMUNICAÇÕES COM MÚLTIPLOS SALTOS (ESQUEMÁTICO).....	56
FIGURA 23 – CENÁRIO LOS: 1 VEÍCULO EM MOVIMENTO - ESQUEMÁTICO (À ESQUERDA); FOTOGRAFIA REAL DO LOCAL (À DIREITA).....	56
FIGURA 24 – RSSI E PDR EM LOS COM 1 VEÍCULO EM MOVIMENTO	57
FIGURA 25 – SIMULAÇÃO DOS VALORES DE RSSI NO TESTE DE ALCANCE MÁXIMO (FONTE: [3])	58
FIGURA 26 – CENÁRIOS LOS: 2 VEÍCULOS EM MOVIMENTO (ESQUEMÁTICO).....	58
FIGURA 27 – RSSI E PDR EM LOS COM 2 VEÍCULOS EM MOVIMENTO.....	60
FIGURA 28 – CENÁRIO DE CRUZAMENTO: MEDIDA 1 (À ESQUERDA); MEDIDA 2 (AO CENTRO); MEDIDA 3 (À DIREITA)	61
FIGURA 29 – LOCAIS DOS TRÊS CRUZAMENTOS: I1 (À ESQUERDA); I2 (AO CENTRO); I3 (À DIREITA)	61
FIGURA 30 – SOMA DA DISTÂNCIA DOS DOIS VEÍCULOS EM CENÁRIOS DE INTERSECÇÕES	62
FIGURA 31 – RSSI E PDR EM NLOS - TESTE 1	63
FIGURA 32 – RSSI E PDR EM NLOS - TESTE 2	63
FIGURA 33 – RSSI E PDR EM NLOS - TESTE 3	64
FIGURA 34 – CENÁRIO TÚNEL – ESQUEMÁTICO (À ESQUERDA); FOTOGRAFIA REAL DO LOCAL – TÚNEL 1 (À DIREITA)	65
FIGURA 35 – RSSI E PDR EM TÚNEIS	65
FIGURA 36 – CENÁRIO VIADUTO - ESQUEMÁTICO (À ESQUERDA); FOTOGRAFIA REAL DO LOCAL (À DIREITA).....	67
FIGURA 37 – RSSI E PDR NUM VIADUTO	67
FIGURA 38 – CENÁRIO TRANSMISSÃO DE VÍDEO: DISTÂNCIAS FIXAS (ESQUEMÁTICO)	69
FIGURA 39 – CENÁRIO TRANSMISSÃO DE VÍDEO: RELAY (ESQUEMÁTICO)	69
FIGURA 40 – EMISSÃO DE VÍDEO: CAPTURA DE ECRÃ.....	70
FIGURA 41 – TRÊS CENÁRIOS PARA RSUs DESLIGADAS (FONTE: [46])	72
FIGURA 42 – DOIS CENÁRIOS PARA RSUs LIGADAS: VEÍCULO ISOLADO E AGREGADO DE 2 VEÍCULOS (FONTE: [46])	73
FIGURA 43 – CENÁRIOS SEM RSUs: BEST CASE (ESQUEMA DE CIMA) E WORST CASE (ESQUEMA DE BAIXO).....	74

FIGURA 44 – RSUs DESLIGADAS (FONTE: [46])	75
FIGURA 45 – RSUs LIGADAS COM UM VEÍCULO ISOLADO (FONTE: [46] - ADAPTADO).....	75
FIGURA 46 – RSUs LIGADAS COM UM AGREGADO (FONTE: [46] - ADAPTADO)	76
FIGURA 47 – SEM RSUs	77

Lista de Tabelas

TABELA 1 – PARÂMETROS TÉCNICOS PARA APLICAÇÕES RELACIONADAS COM A SEGURANÇA NO DOMÍNIO DOS SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES NA FAIXA DE 5875-5905 MHz (FONTE: [19] – ADAPTADO) 11

TABELA 2 – PROTOCOLOS DE ENCAMINHAMENTO DIVIDIDOS POR NATUREZA E DENSIDADE DE TRÁFEGO (FONTE: [52]) 18

TABELA 3 – ALCANCE DE COMUNICAÇÃO COM A COMBINAÇÃO DOS MODELOS FREE-SPACE E TWO-RAY (FONTE: [3]) 31

TABELA 4 – TxPOWER DEFINIDO VS. TxPOWER MEDIDO..... 38

TABELA 5 – COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS ENTRE AS NORMAS IEEE 802.11P E IEEE 802.11A 39

TABELA 6 – DADOS DISPONÍVEIS NO TRANSMISSOR E NO RECEPTOR..... 42

TABELA 7 – PARÂMETROS USADOS 51

TABELA 8 – TAXAS DE TRANSMISSÃO 54

TABELA 9 – ATRASOS EM COMUNICAÇÕES COM MÚLTIPLOS SALTOS 56

Lista de Acrónimos

ABS – ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
AODV – AD HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR
AP – ACCESS-POINT
ARP – ADDRESS RESOLUTION PROTOCOL
ASCII – AMERICAN STANDARD CODE FOR INFORMATION INTERCHANGE
AVI – AUDIO VIDEO INTERLEAVE
BA – BRAKE ASSIST
C2C – CAR TO CAR
C2C - CC – CAR-TO-CAR - COMMUNICATION CONSORTIUM
CCA – COOPERATIVE COLLISION AVOIDANCE
COOPERS – COOPERATIVE SYSTEMS FOR INTELLIGENT ROAD SAFETY
CPU – CENTRAL PROCESSING UNIT
CSV – COMMA-SEPARATED VALUES
DHCP – DYNAMIC HOST CONFIGURATION PROTOCOL
DIVERT – DEVELOPMENT OF INTER-VEHICULAR RELIABLE TELEMATICS
DRIVE-IN – DISTRIBUTED ROUTING AND INFOTAINMENT THROUGH VEHICULAR INTER-NETWORKING
DSRC – DEDICATED SHORT-RANGE COMMUNICATIONS
EBD – ELECTRONIC BRAKEFORCE DISTRIBUTION
ESP – ELECTRONIC STABILITY PROGRAM
EWM – EMERGENCY WARNING MESSAGE
GEO NET – GEOGRAPHIC NETWORKING
GPS – GLOBAL POSITIONING SYSTEM
I&D – INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO
I2V – INFRASTRUCTURE-TO-VEHICLE
IP – INTERNET PROTOCOL
IPSEC – INTERNET PROTOCOL SECURITY
IT – INSTITUTO DE TELECOMUNICAÇÕES
ITS – INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM
LOS – LINE-OF-SIGHT
MAC – MEDIA ACCESS CONTROL
MPEG – MOVING PICTURE EXPERTS GROUP
MPR – MULTIPOINT RELAY
NAHSRP – NATIONAL AUTOMATED HIGHWAY SYSTEM RESEARCH PROGRAM
NEMO – NETWORK MOBILITY
NLOS – NON-LINE-OF-SIGHT
NOW – NETWORK ON WHEELS
NS – NETWORK SIMULATOR
NTP – NETWORK TIME PROTOCOL
OBU – ON-BOARD UNIT
OLSR – OPTIMIZED LINK STATE ROUTING PROTOCOL

PASS2PASS – PASSENGER TO PASSENGER
PASS2V – PASSENGER TO VEHICLE
PC – PERSONAL COMPUTER
PDR – PACKET DELIVERY RATIO
PND – PORTABLE NAVIGATION DEVICE
QoS – QUALITY OF SERVICE
RERR – ROUTE ERROR
RREP – ROUTE RESPONSE
RREQ – ROUTE REQUEST
RSSI – RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATION
RSU – ROAD SIDE UNIT
RTP – REAL-TIME TRANSPORT PROTOCOL
SN – SEQUENCE NUMBER
TCP – TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL
UDP – USER DATAGRAM PROTOCOL
USB – UNIVERSAL SERIAL BUS
V2I – VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE
V2R – VEHICLE-TO-ROAD
V2V – VEHICLE-TO-VEHICLE
VAC – VEHICULAR ADDRESS CONFIGURATION
VANET – VEHICULAR AD-HOC NETWORK
VOD – VIDEO-ON-DEMAND
WAVE – WIRELESS ACCESS IN VEHICULAR ENVIRONMENT
WLAN – WIRELESS LOCAL AREA NETWORK
ZOR – ZONE-OF-RELEVANCE

1. Introdução

Este documento tem como objectivo resumir o trabalho realizado ao longo da Dissertação de Mestrado do curso de Engenharia Electrónica e Telecomunicações do Departamento de Electrónica, Telecomunicação e Informática da Universidade de Aveiro, tendo como título Comunicação entre Veículos – Testes de Comunicações Reais. Esta Dissertação encontra-se englobada no projecto DRIVE-IN (*Distributed Routing and Infotainment through VEhicular Inter-Networking*) [1] em conjunto com o programa Carnegie Mellon University Portugal, tendo como finalidade perceber de que forma a comunicação veículo-a-veículo pode ajudar e melhorar a experiência dos utilizadores e a eficiência global da comunicação de veículos e da estrada.

Neste primeiro capítulo é explicada toda a motivação do trabalho, qual o seu enquadramento, os objectivos propostos e, por fim, uma breve descrição da organização da Dissertação.

1.1 Motivação

Nos dias correntes, os dispositivos GPS (*Global Positioning System*) encontram-se perfeitamente implementados na sociedade, pelo que, num futuro próximo, todos os veículos (carros, camiões, autocarros, motos e mesmo bicicletas) irão possuir um aparelho de posicionamento global, esperando-se assim que esta informação esteja facilmente disponível para utilização, tanto pelos utilizadores, como pelos equipamentos dos veículos, e é neste pressuposto que se baseia esta Dissertação. Espera-se também que os veículos novos venham equipados com comunicações de rede sem fios. Ao ter dispositivos (específicos das redes veiculares) suficientes a circular nas estradas, poderá partilhar-se informação de trânsito, de acidentes, sendo possível a cada equipamento inserido em cada veículo autonomamente efectuar decisões de navegação e/ou de segurança, tudo com base em mensagens que são enviadas pelos nós vizinhos. A investigação de como a comunicação veículo-a-veículo pode ajudar a melhorar a experiência dos utilizadores, bem como tornar toda a comunicação de veículos e da estrada eficiente e diminuir, de forma significativa, o número de acidentes nas estradas, são também pontos fortes para a motivação do grupo de trabalho afecto a este projecto.

Para que todo este sistema funcione da melhor forma, com o mínimo de erro e com o máximo de estabilidade, é necessário haver uma investigação e desenvolvimento fortes nesta área. Assim, esta Dissertação tem como motivação fundamental estudar os limites e as funcionalidades das redes veiculares. Para que as comunicações tenham o melhor desempenho possível existe também a necessidade de criação de novas normas, novas formas de endereçamento IP, desenvolvimento de normas de segurança fiáveis e específicas para as redes veiculares (que melhorem a rapidez com que as comunicações se efectuam), sendo todos estes pontos, entre outros, motivadores para o trabalho desenvolvido neste projecto. É no seguimento desta investigação que surge este trabalho, distinguindo-se do já realizado pelo facto de se trabalhar com a norma específica para redes veiculares, IEEE 802.11p, pelo uso de *drivers* de código fonte aberto e pelo uso de equipamentos extremamente flexíveis e configuráveis, o que

diminui significativamente os custos envolvidos por cada equipamento, tornando possível uma maior e mais rápida penetração das VANETs (*Vehicular Ad-hoc NETWORKs*).

Para além do referido, este tipo de comunicação pode permitir que novas aplicações invadam o nosso quotidiano, tais como a disseminação de informação baseada na localização do veículo e nos interesses dos utilizadores (restaurantes, preços de combustíveis), jogos interactivos entre utilizadores de veículos diferentes (numa situação de espera numa fila de trânsito, por exemplo), redes sociais e VOD (*Video-On-Demand*).

1.2 Enquadramento

A Dissertação descrita neste documento tem por base um projecto de maior escala, o Projecto DRIVE-IN [2], que faz parte do programa Carnegie Mellon Portugal e que está descrito, de uma forma resumida, no próximo subcapítulo 1.2.1. Antes de passar à descrição do mesmo, é importante conhecer o ponto de partida da ideia de implementar em massa as redes veiculares. Como é referido em [3], em 1997 a NAHSRP (*National Automated Highway System Research Program*) completou a investigação do seu projecto, que provou o conceito que veículos completamente automatizados podem cooperar entre eles em situações de auto-estrada. O facto de esta investigação ter sido um sucesso levou a que muitos investigadores começassem a investigar esta área das redes veiculares sem fios, levando a que se chegasse ao nome actual VANET.

Com o número de veículos a aumentar a cada ano, pode começar a haver um problema de congestionamento das estradas existentes, mesmo fora das horas-de-ponta, originando engarrafamentos sucessivos. Uma possível solução será construir mais estradas ou mesmo aumentar o número de faixas (como foi o caso adoptado pela Brisa no troço Aveiro-Porto no presente ano). A solução defendida pela NAHSRP é tornar as estradas já existentes mais eficientes, sem ser necessário construir mais ruas e estradas, pois verifica-se que a construção destas é limitativa em termos de espaço, e têm demonstrado ao longo dos anos que não é uma solução viável para o futuro. O principal objectivo da NAHSRP é, por estes motivos, aproveitar todo o espaço já existente das estradas, automatizando os veículos existentes, como demonstrou ser possível através de uma panóplia de cenários demonstrados com sucesso.

1.2.1 Projecto DRIVE-IN

O projecto DRIVE-IN (*Distributed Routing and Infotainment through VEhicular Inter-Networking*) [2], em parceria com o Instituto de Telecomunicações (Universidade de Aveiro e do Porto), a Universidade de Carnegie Mellon, a NDrive [4], o Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres [5] e a RádiTáxis [6], tem como principal objectivo investigar como é que as comunicações veículo-a-veículo podem melhorar a experiência do utilizador na estrada, bem como a gestão da utilização da mesma. Como foi referido anteriormente, em breve todos os carros, autocarros, camiões, entre outros, irão, de uma forma geral, possuir de forma já integrada sistemas de posição global (GPS) e comunicações sem fios. Assim sendo, a troca de informação

torna-se possível, criando uma rede de veículos dinâmica, em que irão ser distribuídas informações ao alcance dos veículos, tais como alertas de tráfego e acidentes, fazendo com que a navegação seja mais segura, proporcionando uma melhor gestão das estradas e diminuindo o tempo de viagem. Sendo estes os primeiros passos a serem dados depois de a tecnologia estar concluída, será possível implementar-se outro tipo de aplicações, como jogos interactivos/multijogador, redes sociais entre veículos, entre outras.

Uma das grandes vantagens relativamente ao que já existe no mercado (por exemplo, HDTraffic da TomTom [7]), no que diz respeito à organização de tráfego, é que o sistema actualmente implementado é baseado em veículos que actuam como armazenadores de informação de tráfego e comunicam numa arquitectura centralizada cliente-servidor. A penetração de mercado torna-se muito lenta e isto constitui a principal razão de se usar uma arquitectura no contexto de redes veiculares. Como também se pode verificar em [8 pp. 293-307], com um número limitado de veículos podem ser construídas rotas de forma eficiente com um sistema baseado numa arquitectura centralizada, com actualizações de tráfego de 3 em 3 minutos, mas com um grande número de veículos já não será possível.

Um problema que poderá existir é a taxa de penetração do tipo de equipamento proposto por este projecto: de acordo com o C2C – CC (*Car-to-Car – Communication Consortium*) [9], estima-se que demorará cerca de um ano e meio para que se atinja os 10% e 6 anos para se atingir os 50%. A grande vantagem do projecto DRIVE-IN é que, com a ajuda da parceria com a NDrive e da integração dos seus PNDs (*Portable Navigation Devices*) com sistema de comunicações sem fios, vai ser possível construir uma rede com uma elevada percentagem de penetração nos táxis da cidade do Porto. Contrariamente ao mercado dos automóveis, o número de vendas de GPS em 2007 duplicou relativamente a 2006. Para além disso, a TomTom, a Garmin e a NDrive correspondem a 80% dos GPSs portáteis existentes no mercado.

Actualmente, a maioria dos projectos nesta área são conduzidos pelas grandes marcas de fabrico de automóveis, mas estas apenas se encontram focadas na segurança, tendo bastantes restrições relativamente à qualidade de serviço ([8], [10], [11] e [12]). No entanto, o projecto DRIVE-IN está focado, não só na segurança mas também na optimização de rotas e nas aplicações de entretenimento e informação. No projecto existe um leque maior de exploração e investigação, como a mobilidade, navegação, cooperação, taxa de transferência, atraso e largura de banda.

Em termos de plataforma de simulação, o DIVERT (*Development of Inter-VEhicular Reliable Telematics*) [13] já permite fazer simulações de mobilidade com milhares de veículos, com um grau elevado de realismo. Inclui um editor de tráfego, permite definir troços de estradas e escolha de faixas, descrever de forma detalhada a conectividade nas intersecções, introdução de semáforos, entre outros parâmetros direccionados para o comportamento dos veículos, como a agressividade, travagens e acelerações.

Por fim, os 5 pontos principais a desenvolver no projecto DRIVE-IN são descritos abaixo:

- **Geo-Optimized VANET Protocols:** Nesta primeira etapa, o objectivo será explorar as informações obtidas através dos aparelhos GPS, no que diz respeito ao posicionamento, às características das estradas e às condições de tráfego, de forma a optimizar as comunicações sem fios e a própria rede. Com a ajuda do GPS

vai ser possível, por exemplo, diminuir a potência usada em situações de grande densidade de veículos e aumentar em áreas com pouca densidade;

- ***Intelligent and Collaborative Car Routing***: o segundo ponto deste projecto tem como finalidade o uso da informação de tráfego em tempo real, que será disseminado através da VANET, de forma a criar-se uma navegação inteligente;
- ***VANET Applications and Services***: Este terceiro objectivo, de uma forma resumida, propõem-se a investigar uma série de aplicações e serviços que irão contribuir para uma melhoria na experiência e na segurança de condução, como é o caso da disseminação da mensagem “Acidente à frente!”, em conjunto com a activação do *airbag*. Por outro lado, a utilização/activação do sistema de travagem anti-bloqueio (ABS - *Anti-lock Braking System*), do sistema de distribuição electrónica da força de travagem (EBD - *Electronic Brakeforce Distribution*), do sistema BA (*Brake Assist*), do controlo electrónico de estabilidade (ESP - *Electronic Stability Program*) ou de outros, pode, conjuntamente com estas informações, enviar mensagens a avisar do perigo à frente na estrada;
- ***High Performance VANET Simulation***: Melhorar o simulador DIVERT para outro nível, 2.0. No simulador actual, têm-se verificado alguns padrões de mobilidade irreais, principalmente no modelo dos comportamentos em cruzamentos. O estudo presente foca-se na análise extensiva dos dados fornecidos pela *testbed* realizado nos táxis do Porto;
- ***Deployment and Experimentations***: Por último, o objectivo final será fazer testes em ambiente real, vindo completar a função dos simuladores. Com a ajuda da RádiTáxis, existem 465 táxis que circulam 24 horas por dia, em turnos de 8 horas. Comparativamente às 2h por dia que cada pessoa normalmente conduz, o teste com táxis será equivalente a um teste entre 6000 a 12000 veículos de condutores individuais.

1.3 Objectivos

Esta Dissertação, inserida no grupo de trabalho já existente no Instituto de Telecomunicações (IT) da Universidade de Aveiro, tem como finalidade estudar e observar as características das redes veiculares. Para que este estudo fosse feito da forma mais fidedigna possível, houve a necessidade de desenvolver e implementar a norma desenhada especificamente para as redes veiculares, IEEE 802.11p / WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environment*). Após este processo estar completo, idealizaram-se testes e cenários frequentes do mundo real para analisar o que se pode conceber, efectivamente, com uma rede veicular.

Desta forma, os objectivos desta Dissertação são os seguintes:

- Desenvolver o *software* necessário para permitir a recolha e a análise dos dados para cada cenário testado;
- Verificar qual o tempo de associação (tempo mínimo necessário para que uma placa, após de ter sido ligada, conseguir identificar-se na rede);
- Observar quais as taxas máximas de transmissão do equipamento (com rotas estáticas e com alguns protocolos de *encaminhamento ad hoc*);
- Concluir acerca do atraso derivado das comunicações com múltiplos saltos;
- Verificar qual o alcance máximo conseguido com linha de vista entre dois equipamentos, de forma a averiguar os limites de comunicação em ambiente veicular;
- Estudar o desempenho da transmissão a diferentes velocidades relativas, com o fim de verificar se esta situação poderá ser, no futuro, um problema nas comunicações veiculares. Este teste é bastante importante por ser uma situação bastante comum nas VANETs;
- Verificar se é possível ter, em intersecções, uma distância de comunicação suficiente, de modo a que se possa enviar, a tempo, mensagens de segurança e/ou de controlo;
- Observar o desempenho das comunicações em túneis, verificando se estes pioram ou melhoram as comunicações entre veículos;
- Estudar o desempenho das comunicações em viadutos, por forma a analisar a disseminação de dados entre veículos com diferentes cotas;
- Verificar a possibilidade de transmitir vídeo entre os equipamentos;
- Concluir sobre melhoria nas comunicações com a presença de infra-estruturas instaladas ao longo da estrada e se a conectividade entre elas têm, também, algum impacto no desempenho.

Por fim, o objectivo final será introduzir estes equipamentos testados na *testbed* já iniciada no Porto, em cerca de 465 veículos, de forma a conseguir-se retirar dados em escala real através de comunicações veículo-a-veículo.

Este trabalho deu já origem a um artigo científico aceite na ACM VANET 2011: The Eighth ACM International Workshop on VehiculAr Inter-NETworking, 'Real-world Implementation and Evaluation of IEEE 802.11p for Vehicular Networks', Setembro 2011, com o objectivo de se mostrar a implementação da norma IEEE 802.11p, assim como alguns resultados com e sem linha vista. Encontram-se em preparação outros artigos que descrevem o trabalho realizado com a integração de estações fixas na rede, assim como os serviços suportados.

1.4 Organização da Dissertação

A presente Dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

- O capítulo 1 apresenta e contextualiza a Dissertação, descrevendo a motivação, os objectivos e o seu enquadramento;
- No capítulo 2 é apresentado o estado de arte das redes veiculares, sendo descritas algumas noções básicas e os principais conceitos, com o propósito de enquadrar o leitor no tema abordado. Ao longo desta descrição são referidos vários artigos e trabalhos de investigação realizados ao longo dos últimos anos;
- No capítulo 3 é apresentado todo o desenvolvimento necessário para a realização da *testbed* experimental. Nesta secção é descrito todo o equipamento utilizado, as aplicações que foram desenhadas, um resumo da implementação da norma IEEE 802.11p e alguns dos desafios encontrados;
- No capítulo 4 são apresentados os cenários realizados e os resultados obtidos, sempre acompanhados de uma avaliação e discussão;
- No capítulo 5 é feita uma conclusão do trabalho apresentado, fornecendo uma visão global da Dissertação, e são sugeridas as linhas de investigação que podem ser seguidas numa fase posterior.

2. Estado de Arte das Redes Veiculares

Neste capítulo irá ser apresentado um resumo dos trabalhos realizados na área da Dissertação, tendo por base artigos e livros publicados. São também descritos alguns dos conceitos básicos, enquadrando o leitor no tema abordado. No contexto desta Dissertação surge a sigla VANETs que proporciona a comunicação a curta e a média distância através de uma interface sem fios. Uma VANET é uma rede veicular *ad hoc* (rede descentralizada que não depende de uma infra-estrutura pré-existente como *routers* ou APs (*Access-Points*), onde cada nó actua como um *router*, fazendo reencaminhamento dos dados em forma dinâmica baseando-se na conectividade presente da rede) que permite as comunicações entre veículos e entre veículos e equipamentos fixos ao longo da estrada (RSUs – *Road Side Units*). Esta infra-estrutura tem a possibilidade de possuir um melhor *hardware*, um melhor consumo de energia e um menor custo de manutenção, quando comparada aos equipamentos instalados nos veículos.

Os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS - *Intelligent Transportation System*) podem proporcionar melhorias importantes na eficiência do sistema de transportes, na segurança de todos os utilizadores da estrada e no conforto da mobilidade. Para tal, as comunicações entre os veículos e a infra-estrutura rodoviária devem ser fiáveis e rápidas.



Figura 1 – Sistemas de Transportes Inteligentes (fonte: [14])

A Figura 1 representa uma panóplia dos Sistemas de Transportes Inteligentes, onde, por exemplo, a comunicação veículo-a-veículo, os sistemas de segurança, sinais de trânsito ou semáforos a trabalharem de forma activa, bem como o planeamento de rotas, vão influenciar, num futuro próximo, todos os nossos hábitos actuais de comportamento em estrada.

2.1 Definição

Uma rede veicular é uma nova classe das redes sem fios que tem emergido na indústria automóvel. Estas redes, também conhecidas como VANETs, vão permitir, como já foi dito anteriormente, a comunicação inter-veículo (sendo estes individuais ou de companhias privadas ou mesmo transportes públicos, como autocarros ou veículos de polícias, ambulâncias, entre outros) ou com infra-estruturas montadas ao longo da estrada, que poderão pertencer ao estado, operadores privados ou prestadores de serviços.

Os avanços recentes na tecnologia sem fios e nas redes *ad hoc* permitiram o desenvolvimento de diferentes arquitecturas de redes veiculares na auto-estrada, ambientes rurais e ambientes citadinos. Destas arquitecturas destacam-se as seguintes: comunicação sem fios veículo-a-veículo (V2V – *Vehicle-to-Vehicle*), sem suporte de qualquer infra-estrutura, fazendo chegar a informação salto-a-salto, com os veículos a recolher e a processar a informação, partilhando-a com os restantes; e uma comunicação híbrida chamada de V2R (*Vehicle-to-Road*), que não pressupõe comunicação constante com a infra-estrutura fixa (como o V2I – *Vehicle-to-Infrastructure*), mas representa um apoio para uma melhoria de desempenho. Desta forma, em último caso, os veículos podem comunicar com uma RSU e estas, através de um único salto ou múltiplos saltos, conseguem comunicar com o respectivo destino.

Uma rede veicular é composta por veículos equipados com OBUs (*On-Board Unit*) que, em termos gerais, são aparelhos com capacidade de comunicação (com ou sem fios), e RSUs. As OBUs poderão ser vistas como sendo nós móveis e as RSUs como sendo os nós estáticos.

Falta referir que as RSUs poderão estar ligadas à Internet e, desta forma, existem duas formas de acesso: as RSUs podem permitir que os OBUs possam aceder à infra-estrutura e consequentemente à Internet; ou as OBUs poderão ter acesso à Internet através de *hot spots* (públicos ou privados). Em todo o caso, quando nenhum destes acessos for possível, poderá sempre existir a hipótese da rede celular (GSM, GPRS, UMTS, WiMax, 4G, etc.), se estas estiverem integradas nas unidades a bordo. No entanto, as redes celulares não foram projectadas para este tipo de cenários, com comunicações durante largos períodos de tempo e com volumes de tráfego elevados.

Em seguida são apresentadas algumas características específicas e desafios das VANETs.

2.1.1 Características Específicas

As redes veiculares são redes muito particulares devido às suas características inerentes. Segundo [15], as redes veiculares possuem as seguintes vantagens:

- **Potência ilimitada:** desde que o veículo esteja ligado, a alimentação dada pela bateria/motor é a necessária para que haja uma energia contínua para computação e comunicação, não havendo assim problemas de falta de energia;
- **Mobilidade previsível:** ao invés das redes móveis *ad hoc* clássicas (onde é difícil de prever a mobilidade dos nós), os veículos tendem a ter um movimento bastante previsível

(usualmente) limitado às estradas. Através da tecnologia GPS (acesso à posição, velocidade média, velocidade instantânea e trajectória) é possível prever uma posição futura num determinado instante.

2.1.2 Desafios

Como é natural, as redes veiculares apresentam características muito próprias devido à alta mobilidade dos nós e da constante mudança de cenário. Assim, como qualquer outra rede, terão de ser ultrapassados alguns desafios, entre os quais [16 pp. 347-351]:

- **Potencialidade a larga escala:** a maior parte dos casos estudados assumem uma rede limitada. Contudo, uma rede veicular irá ser estendida a toda a rede rodoviária, que poderá incluir muito mais veículos do que o vulgarmente estudado;
- **Alta mobilidade:** o ambiente das redes veiculares pode ser extremamente dinâmico e a rede terá que ter a capacidade de se adaptar e funcionar correctamente em qualquer cenário: em auto-estrada poderá haver velocidades relativas acima dos 300 km/h, em que a densidade de veículos poderá ser entre 1 a 2 veículos por quilómetro, e, em meio urbano, a velocidade relativa poderá ser maior que 60 km/h, com uma grande densidade de veículos, principalmente nas horas de ponta;
- **Rede Particionada:** as redes veiculares poderão estar constantemente a ser particionadas. A natureza dinâmica do tráfego irá deixar lacunas na rede, principalmente em zonas em que os veículos são mais escassos, com agregados de nós muitas vezes isolados (grupo de veículos com conectividade em que o veículo mais à frente deste grupo não consegue comunicar com o próximo veículo e o veículo mais a trás não consegue comunicar com o veículo anterior);
- **Topologia e Conectividade da Rede:** os cenários das redes veiculares são bastante diferentes das redes clássicas *ad hoc*. Desde que os veículos estejam em movimento e a mudar de posição constantemente, os cenários são muito dinâmicos. Desta forma, a topologia das redes muda frequentemente, sempre que há ligação e interrupção da ligação dos nós. De facto, a conectividade dos nós irá depender de dois grandes factores: alcance das comunicações sem fios e a fracção dos veículos participantes, onde apenas uma fracção de veículos na estrada estão equipados com interface IEEE 802.11p.

Um dos desafios ainda pouco estudado das redes veiculares é relativo às obstruções dos próprios veículos nas comunicações, funcionando como obstáculos, pelo facto de as antenas não estarem a uma altura suficiente para que este problema seja descartável.

2.2 Conceitos

Segundo [17], existem alguns conceitos básicos que são necessários e importantes para a compreensão das aplicações das redes veiculares, como o Equipamento Básico, as Normas e o Endereçamento.

2.2.1 Equipamento Básico

Nas redes veiculares é sempre assumido que existe um equipamento a bordo (OBU). De seguida, é apresentado a lista de *hardware* que grande parte dos artigos assume que existe:

- Uma CPU (*Central Processing Unit*) que implementa as aplicações e os protocolos de comunicação;
- Uma antena que transmite e recebe dados de e para os veículos vizinhos e as RSUs;
- Um GPS que permite, com precisão, saber a posição e o tempo da sincronização da informação;
- Sensores apropriados para medições de vários parâmetros que têm de ser medidos e, se necessário, transmitidos;
- Uma interface de entrada/saída que permite a interacção humana com o sistema.

2.2.2 Normas

Segundo [18], em 1999, a U.S. Federal Communication Commission reservou nos Estados Unidos da América uma largura de banda de 75MHz da DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*) nos 5.9GHz (5.850-5.925 GHz) para ser de uso exclusivo para comunicações veículo-a-veículo ou entre veículos e infra-estrutura. O principal objectivo inicialmente seria o desenvolvimento de aplicações de segurança, de forma a diminuir-se o número de acidentes rodoviários, e o desenvolvimento de aplicações para se melhorar o fluxo de tráfego. Na zona asiática, o Japão reservou a banda de frequência entre 5.770 a 5.850 GHz para a DSRC. Na Europa, conforme [19], a banda 5875-5905 MHz é reservada para segurança rodoviária, tendo 20 MHz acima desta banda para extensões futuras, e o espectro 5855-5875 MHz é reservado para aplicações sem ser de segurança (ver Figura 2). “A selecção desta faixa será igualmente compatível com a utilização do espectro noutras regiões do mundo, pelo que promoverá uma harmonização à escala mundial” [19]. A Tabela 1 destaca a potência máxima de emissão permitida (33dBm).

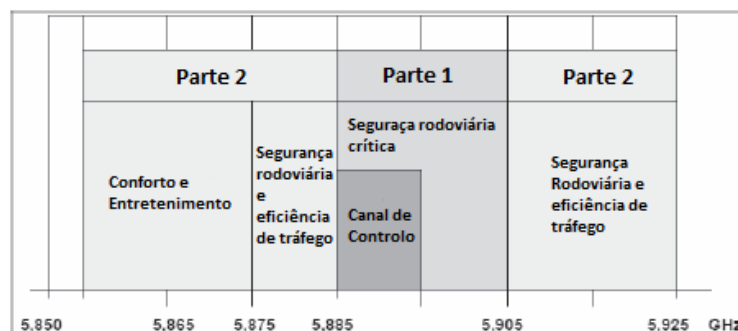


Figura 2 – Proposta de espectro para aplicações de segurança e eficiência do tráfego na Europa (fonte: [20])

Tabela 1 – Parâmetros técnicos para aplicações relacionadas com a segurança no domínio dos Sistemas de Transporte Inteligentes na faixa de 5875-5905 MHz (fonte: [19] – adaptado)

Parâmetro	Valor
Densidade espectral de potência máxima	23 dBm/MHz
Potência máxima de emissão	33 dBm

Neste sentido, alguns investigadores realizaram alguns testes de forma a descobrirem possíveis problemas deste tipo de redes. De seguida são descritos alguns trabalhos em que é estudada a norma de forma aprofundada, assim como são apresentadas as principais conclusões.

As aplicações de segurança nas redes veiculares não toleram grandes atrasos na entrega das mensagens, assim como nas aplicações de conforto ou de serviços em que existe um tempo limitado para essa troca de informação, pelo facto de se estar dependente do tempo que os veículos permanecem na ZOR (*Zone-Of-Relevance* – ver 2.3.1). Adicionalmente, o rápido movimento dos veículos e o ambiente complexo em volta das VANETs apresentam desafios interessantes ao nível do protocolo IEEE 802.11p e da WAVE [21]. Já [22] testa o desempenho e a melhoria trazida pelo protocolo através de várias simulações em NS-2. Neste artigo mostra-se que os parâmetros indicados pelo protocolo para a camada MAC podem levar a que a taxa de transferência seja prejudicada pelo facto de o tamanho da janela ser fixo e não dinâmico e adaptativo ao número de veículos em questão. Assim, uma das soluções propostas é os veículos usarem observação local de forma a adaptarem a sua janela. Com esta abordagem mostram que têm melhorias significativas sobre o protocolo MAC e que existe uma boa adaptação a condições dinâmicas e de grande densidade de veículos. Trabalhos anteriores, como [23] e [24], já tinham explorado esta matéria onde reforçam algumas das conclusões. No primeiro trabalho foi investigado a capacidade do protocolo IEEE 802.11 e foi mostrado que o tamanho da janela teria que ser escolhido de forma dinâmica; no segundo foram analisadas as potencialidades do protocolo IEEE 802.11p, sendo apresentada uma visão global das capacidades e das potencialidades da tecnologia. [34] refere que o tempo de *re-healing* (tempo necessário para se transmitir a informação entre a fonte e o destino, que se encontram desconectados, neste caso numa situação de duas faixas com RSUs ligadas e desligadas) em cenários de auto-estrada poderá variar desde poucos segundos a vários minutos. Por fim, [25] ainda sublinha que o processo de *store-carry-forward* poderá ser uma solução para o encaminhamento de redes desligadas [26]. As técnicas de disseminação da informação foram estudadas na troca de dados em diferentes

direcções (intersecções) [27], comunicações através de infra-estruturas de forma a proporcionar conectividade na rede [28], ou o uso de GPS e informação do mapa para a determinação de quem encaminhar o pacote [29].

2.2.3 Endereçamento

Para a maior parte das aplicações é necessário um método de endereçamento que, segundo [17], possa ser distinguido em dois tipos: endereçamento fixo e endereçamento geográfico. O primeiro tipo de endereçamento supõe que cada nó tem um endereçamento fixo desde o momento que se junta à rede (o mais comum nas redes *ad hoc*). No endereçamento geográfico cada nó terá um endereço caracterizado pela sua posição geográfica, isto é, à medida que o nó se movimenta, o endereço irá mudar. Alguns atributos poderão decidir qual o endereço a usar, tais como a direcção do veículo, a identificação da estrada, o tipo de veículo, características físicas (mais alto que, mais pesado que, maior velocidade que, etc.) e características do próprio condutor (principiante, profissional...).

Com a panóplia de serviços possíveis e oferecidos nas VANETs e devido à sua dinâmica e mobilidade, é bastante difícil manter uma ligação estável durante um tempo largo [30]. No entanto, [31] foca-se na necessidade de os IPs dos nós terem de ser configurados de forma automática num curto espaço de tempo, sublinhando que a necessidade desta reconfiguração terá que ser mínima. O objectivo deste artigo é exactamente propor um novo modelo de configuração, pois os actualmente existentes falham no desempenho conseguido. Para tal, os autores propõem um novo protocolo de configuração automática de endereços IP, o VAC (*Vehicular Address Configuration*), especialmente desenhados para as VANETs. O que este protocolo faz é explorar as topologias das redes veiculares, cujo protocolo DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) é activo, escolhendo dinamicamente o “Líder” dos veículos para que seja reduzida a ocorrência de reconfigurações derivadas da mobilidade dos nós. Os *Líderes* actuam como servidores DHCP, permitindo que as configurações dos nós sejam bastante rápidas, pois não existe atraso devido à descoberta da informação, nem pela entrega dos vários parâmetros ao longo da rede, sendo sempre dado apenas por um veículo do agregado.

Para além desta abordagem, em que todo o processo é baseado no ‘Líder’, existem outras duas também bastante comuns: a Descentralizada e a *Best-Effort*. Na abordagem Descentralizada, o problema da autoconfiguração de endereços é resolvido de forma distribuída, isto é, um nó que necessita de um endereço transmite uma solicitação em *broadcast* com o objectivo de receber os parâmetros de configuração através da interacção com os outros nós. Embora esta solução seja a mais simples de implementar em redes *ad hoc*, [32] e [33] alertam que esta abordagem poderá gerar uma grande quantidade de tráfego, devido às características das VANETs (redes muito dinâmicas e com grande densidade de veículos), propondo, desta forma, novas implementações de forma a terem em conta as partições da rede e com o objectivo de diminuir o *flooding*. Por fim, a solução *Best-Effort* não garante que cada endereço na rede é único. Se os veículos com endereços iguais não comunicarem entre si, não existe qualquer problema. Todavia, se os nós com endereços duplicados interagirem, começam a surgir erros e conflitos que têm de ser resolvidos. [34] e [35] concluem que esta abordagem aplicada em aplicações em tempo real não é

a mais apropriada, pois o desempenho e a transmissão dos dados fica pendente até nova atribuição de IPs. Como solução, os dois últimos artigos citados criaram mecanismos de detecção de endereços duplicados, com o cuidado de terem um *overhead* reduzido.

2.3 Propagação de dados e Rotas

Como já foi dito anteriormente, as redes veiculares distinguem-se das redes comuns *ad hoc* pelo facto de se terem de adaptar a diferentes tipos de densidade de nós [36], como a grande densidade de veículos em auto-estrada e cidade em horas de ponta, comparativamente a aldeias ou a determinadas horas, fora das horas de ponta. Com a quantidade de aplicações, desde segurança a lazer, os veículos terão que ter uma filtragem daquilo que será mais prioritário (segurança).

A grande questão nesta altura é que, tal como referido por [37] e [38], a maior parte dos artigos publicados e os casos estudados sobre o problema de *broadcast storm* são simplificados tendo em conta que a rede veicular se encontra sempre ligada, o que não é verdade, até porque a penetração das VANETs vai ser lenta e, no início, os problemas de ligação vão ser maiores. No futuro, com o aumento de veículos com este tipo de comunicação, as infra-estruturas vão ser cada vez menos precisas, devido à proliferação das mensagens realizada pelos próprios veículos. Assim, os algoritmos de propagação terão que ser dependentes do tipo de mensagem, ou seja, tem sentido que mensagens de segurança/urgência tenham como destino *broadcast* (para que a mensagem seja propagada o mais rapidamente possível ao maior número de veículos) e mensagens de lazer/jogos terão de ser mensagens *unicast* (um único emissor e transmissor) ou *multicast* (um único emissor e vários receptores) de forma a reduzir o problema mencionado.

De seguida são apresentadas propostas de Propagação de dados e Protocolos de Encaminhamento.

2.3.1 Propagação de dados

O principal objectivo das redes veiculares é a propagação de dados entre os veículos, usando, quando necessário, RSUs. Por isso, é importante referir alguns conceitos básicos acerca deste tema.

Analisando a Figura 3, podem-se observar dois modos de envio da informação: se tem um ou múltiplos saltos (*single-hop* ou *multihop*) e a quem é dirigida (*unicast*, *multicast* ou *broadcast*).

Segundo [17], a propagação dos dados em *single-hop* é usualmente implementada em *broadcast*, como pode ser visto na Figura 3 (a), onde o veículo A envia a informação apenas aos veículos que estão ao alcance dele (ou seja, o veículo B nunca terá acesso a esta informação). A propagação em *multihop* é a mais comum nas VANETs: os dados podem ser enviados por múltiplos saltos, em que os veículos que se encontram no meio actuam como *relays* (veículos responsáveis pelo reencaminhamento das mensagens), como pode ser visto na Figura 3 (b), onde o veículo C faz a retransmissão da mensagem enviada por A, pelo facto de B não estar dentro do alcance deste e não poder receber a informação de forma directa. No entanto, um sistema

multihop requer que haja uma camada na rede que seja capaz de usar um *encaminhamento multihop*. Inclusivamente, existe uma série de variantes híbridas que têm vindo a ser propostas como, por exemplo, a propagação ser feita em *multihop* até à RSU mais próxima e esta transmitir aos restantes veículos usando propagação *single-hop*.

Como foi referido acima, a propagação também pode ser feita tendo por base o *unicast*, *multicast* ou o *broadcast*. Nas redes veiculares, muitas aplicações relacionadas com a segurança pública requerem que a propagação de dados seja feita, por exemplo, para todos os veículos de uma área específica que se encontram a conduzir numa determinada direcção, que corresponde às especificações do grupo referido anteriormente. A propagação por *broadcast* poderá gerar informação sem interesse para determinados veículos, por isso normalmente o *broadcast* é usado para uma determinada área, a ZOR (ver 2.4.1.2).

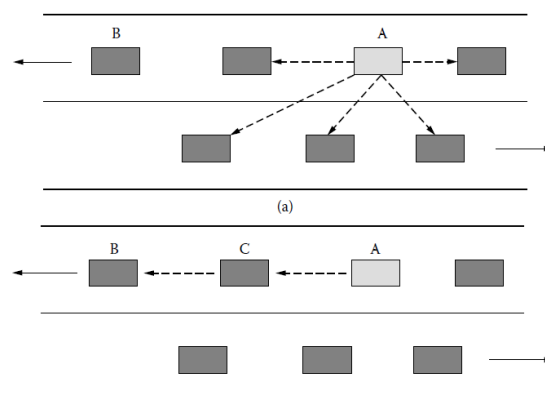


Figura 3 – Propagação de dados [17]

Relativamente ao tipo de comunicações que podem existir nas redes veiculares, estes podem ser divididos, essencialmente, em três tipos:

- Comunicação *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), que apenas tem como intervenientes os próprios veículos, onde a mensagem chega ao destino por um ou múltiplos saltos, sendo uma comunicação sem fios pura;
- Comunicação *Vehicle-to-Road* (V2R), também denominada de propagação híbrida, tem como destino um ou mais veículos, mas ao invés do tipo de propagação anterior (realizada apenas por veículos), esta usa a infra-estrutura instalada ao longo da estrada para permitir que a mensagem chegue ao destino de forma mais rápida (melhorando o desempenho ou fornecendo acesso a determinados serviços) (Figura 4);
- Por fim, a comunicação *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) difere das anteriores pelo destino não ser um veículo, mas sim uma RSU, tendo como principal utilidade o acesso à Internet ou outras redes.

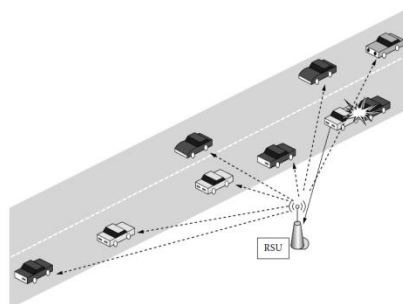


Figura 4 – Rede veicular baseada numa comunicação Vehicle-to-Road (fonte: [39])

No entanto, poderá sempre haver uma combinação dos tipos de propagação apresentados anteriormente, porque, por exemplo, um V2R não é mais que uma comunicação V2I conjunta com uma I2V (*Infrastructure-to-Vehicle*), onde poderá ocasionalmente existir uma comunicação V2V. Por fim, na Figura 5 são apresentados alguns tipos de comunicação orientados aos passageiros, como as comunicações entre passageiros (PASS2PASS – *Passenger to Passenger*), comunicações entre um simples passageiro e um veículo (PASS2V – *Passenger to Vehicle*), partilha de dados e comunicação entre veículos (V2V, também conhecido como C2C – *Car to Car*) e o uso das infra-estruturas instaladas ao longo da estrada (V2I).

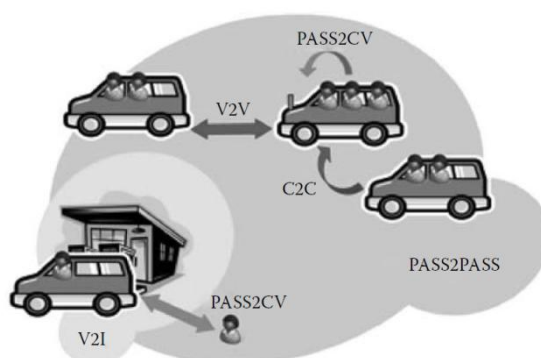


Figura 5 – Serviços de comunicações sem fios orientadas ao passageiro (fonte: [40])

Por fim, falta referir que o mecanismo de *store-carry-forward* é também uma forma de propagação/reencaminhamento de dados. Este mecanismo tem como vantagem o armazenamento da informação quando esta não pode ser entregue em determinada situação no momento em que o nó recebe os dados (bastante comum em situações de rede pouco densa). Assim que possa enviar a informação recebida, a mensagem é reencaminhada por outro nó (estático, via RSU, ou dinâmico, via outro veículo).

Nas redes veiculares é possível que a comunicação entre nós possa ser feita apenas através de comunicações veículo-a-veículo. Acontece que, em determinadas situações em que haja um espaço grande entre os diferentes agregados, a comunicação V2V não é suficiente para que a informação seja rapidamente disseminada e distribuída. Em [41] os autores mostram o impacto do bom posicionamento das RSUs na propagação da informação (segurança ou conforto)

e desenvolvem um algoritmo que calcula geograficamente a melhor posição das estruturas fixas de forma a ter os melhores benefícios. No entanto, este algoritmo foi pensado para cenários de ambientes urbanos, local onde até terão menos impacto. Em [42] um estudo designa as RSUs como servidores de *proxy* de Internet que transmite dados para os utilizadores. Em [43] é considerada a instalação de *gateways* com acesso à Internet, mas é assumido que existe cobertura total de RSUs. A investigação de [44] levou à análise das probabilidades de ligação em redes veiculares com RSUs onde não existem quaisquer valores de atraso e onde não são contempladas faixas com ambos os sentidos. Um ponto fulcral que foi estudado em [45] foi o facto de se analisar o desempenho com e sem infra-estruturas em cenários de auto-estrada, em que o número de veículos é escasso, o que faz com que se encontrem bastante espaçados. Neste trabalho foram desenvolvidos modelos matemáticos que analisam o desempenho das comunicações neste tipo de cenários, em que as RSUs funcionam como *relays*. Este artigo conclui que o tempo de *re-healing* é significativamente reduzido quando a infra-estrutura se encontra ligada. Todavia, os melhores resultados foram conseguidos na presença de uma maior densidade de RSUs, apresentando grandes vantagens nas situações em que a informação é passada por múltiplos agregados.

O trabalho desenvolvido em [46] realça o facto de a instalação as RSUs melhorar o tempo de *re-healing*, sendo esta melhoria significativa quando estas se encontram ligadas. Embora as RSUs desligadas melhorem as comunicações, são demasiado dependentes do alcance de cada uma. O alcance é um dos factores mais importantes na diminuição do atraso nas comunicações. Como a infra-estrutura não tem tanta limitação técnica como os veículos, é possível que estas tenham melhor equipamento, mais potência, melhor posicionamento, localização e orientação, assim como ter um receptor bastante mais sensível. O autor defende, inclusivamente, que a instalação de duas antenas direccionais, ao contrário de uma, poderá trazer grandes benefícios ao alcance das RSUs, pois é possível focar o diagrama de radiação ao longo da estrada, aumentando deste modo o ganho da antena numa determinada região de interesse e, ao mesmo tempo, reduzindo o ruído e as interferências captadas de outras fontes.

Em [26] é estudada a forma como a movimentação dos veículos pode contribuir para o sucesso da entrega de mensagens, fazendo com que possam ser reencaminhadas, isto é, ser guardadas temporariamente nos nós correspondentes enquanto aguardam pela possibilidade de poderem reencaminhar a mensagem. Em suma, foi concluído que a mobilidade dos nós em cenários de auto-estrada melhora a transmissão (o atraso fim-a-fim é diminuído) se a informação for guardada até encontrar um caminho favorável para a sua entrega. O sucesso na entrega de pacotes também é mais elevado quando existem cenários com mais movimento, que acontece no caso de tráfego nos dois sentidos, com duas faixas cada, e no caso de um único sentido, com múltiplas faixas. Por fim, é também verificado que em situações de pouca densidade de veículos os valores de atraso aumentam na ordem dos segundos, o que em aplicações de multimédia se torna intolerável. [47] mostra também a utilidade do uso de *relays*, mas as conclusões apresentadas têm em conta a observação apenas de autocarros, que, naturalmente, nunca circulam juntos e circulam sempre com rotas bastante específicas. Em [48] é proposto um protocolo *multicast* para cenários de auto-estrada onde é medida a fracção de nós que entrega as mensagens com sucesso através do reencaminhamento. Por sua vez, os autores de [49] analisam o mesmo cenário de auto-estradas, mas com a diferença de terem todos os nós móveis sob

controlo para que as suas trajectórias sejam modificadas com o objectivo de os valores de atraso serem diminuídos. Por fim, [50] inicia o seu estudo a partir de um modelo de movimento aleatório dos nós e mostra que esta movimentação leva a uma taxa de transferência constante à medida que a rede aumenta de tamanho.

2.3.2 Protocolos de Encaminhamento

Ao longo do trabalho realizado nesta Dissertação, foi necessário recorrer a alguns protocolos de encaminhamento. De forma a escolher-se o mais adequado, foi feita uma pesquisa com o objectivo de verificar quais os existentes para as redes *ad hoc* móveis e quais os que apresentam o melhor desempenho.

Uma rede sem fios *ad hoc* consiste numa rede móvel descentralizada, onde o termo *ad hoc* é usado pelo facto de os nós presentes na rede não pertencerem a uma infra-estrutura pré-existente, ou seja, toda a arquitectura é criada sem a ajuda dos *routers* tradicionais com posição fixa. Contudo, a arquitectura terá de manter a comunicação entre os nós com a dificuldade de estes estarem sempre em movimento e terem um alcance limitado. Os protocolos de encaminhamento para redes sem fios *ad hoc* deverão ser capazes de lidar com um número largo de nós com recursos limitados, quer em termos de energia, quer em termos de largura de banda. Desta forma, todos os nós da rede têm de se comportar como *routers* e ter como função a descoberta de novas rotas e manutenção das já existentes.

Os desafios e os requisitos que os protocolos de encaminhamento, aplicados às VANETs, devem ter são [51]:

- Operação localizada (as decisões de encaminhamento apenas têm como base a informação local);
- Descoberta de novos vizinhos (através de *beacons*, podendo estes serem adaptáveis à mobilidade da rede);
- Identificação do destino;
- Previsão da trajectória (saber, por exemplo, que determinados pacotes para chegar a um certo destino têm que seguir determinadas ruas/rotas);
- Reencaminhamento de dados;
- Capacidade de lidar com as partições na rede (mecanismos de *store-carry-forward*);
- Previsão de eventos futuros (por exemplo, através da velocidade e do trajecto de um nó conseguir prever a sua posição a determinado instante);
- Uso de informação adicional (por exemplo, tráfego).

A classificação dos protocolos específicos das VANETs é dividida pelos autores normalmente de duas formas: uns autores dividem-nos pela forma como os protocolos se adaptam às informações que obtêm em tempo real (como o mapa, as trajectórias dos vários nós e a informação de tráfego) e outros segundo a sua natureza (*unicast*, *multicast* ou *broadcast*). Na

Tabela 2 encontram-se vários protocolos de encaminhamento divididos com uma mistura das duas formas de divisão expostas, isto é, pela natureza e pela densidade de tráfego.

Tabela 2 – Protocolos de Encaminhamento divididos por natureza e densidade de tráfego (fonte: [52])

Tipo de Tráfego	Tipo de Comunicação				
	Unicast		Multicast		Broadcast
	Topologia	Posição	Geográfico	Mobilidade	
Adaptado a redes dispersas		Epidemic		Epidemic	Epidemic
		MDDV		MDDV	MDDV
		VADD		VADD	VADD
Geral	AODV	DREAM	DRG	RBM	DREAM
	DSR	GSR	GAMER	VTRADE	
	Fast OLSR	MGF	IVG		
	OLSR	MORA	LBM		
		MURU	MGF		
Adaptado a redes densas	CBRP	CAR	GeoGRID	LBF	
	HSR	LORA-CBF		OABS	
		GPCR		ODAM	
		GPSR		SB	
				SOTIS	
	UMB				

Para além da divisão anterior, esta também pode ser subdividida baseando-se na forma como é feita a descoberta de novos nós: proactivos ou reactivos. Os protocolos proactivos são protocolos que mantêm sempre a sua tabela de encaminhamento actualizada enviando constantemente, de forma periódica, mensagens de controlo para todos os nós ao seu alcance. Quando existem alterações na rede, estas são propagadas a toda a rede, actualizando as tabelas de todos os nós. Os protocolos reactivos, ao invés de estarem sempre a criar rotas independentemente da sua utilização, apenas geram as rotas quando necessário para uma determinada transferência de dados e é mantida até expirar. Normalmente os protocolos reactivos têm um melhor desempenho em redes com poucos nós, maior mobilidade e elevada interrupção da ligação da rede (auto-estradas), e os protocolos proactivos em redes mais densas, com menor mobilidade e topologia da rede mantida durante mais tempo (ambientes urbanos).

Como se pode verificar, existem vários protocolos de encaminhamento usados em redes móveis, porém os mais usados e mais referenciados são o protocolo reactivo AODV e o protocolo proactivo OLSR (*Optimized Link State Routing protocol*). De seguida, são explicados os dois protocolos usados nesta Dissertação que foram escolhidos por já possuírem implementações disponíveis passíveis de serem usadas.

2.3.2.1 AODV

O protocolo AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*) é um protocolo de encaminhamento específico para redes *ad hoc* móveis e é considerado um protocolo reactivo, o que significa que estabelece a rota com o destino apenas quando é necessário, e a tabela de rotas é mantida apenas enquanto for necessária. As tabelas de encaminhamento guardam a informação acerca do próximo salto até ao destino, bem como o número de sequência que é recebido do destino de forma a indicar a “frescura” da informação recebida. As principais vantagens da utilização do AODV são [53]:

- Não necessita de nenhum sistema central administrativo para garantir o processo de encaminhamento;
- As mensagens de controlo de tráfego são reduzidas (embora com o custo de se aumentar a latência na procura de novas rotas) e as mensagens de RREQ (*Route REQuest*) e RREP (*Route Response*), que são responsáveis pela descoberta das rotas, não aumentam significativamente o *overhead* (número de mensagens de controlo relativamente às mensagens de controlo com as de dados);
- Reage rapidamente à mudança de topologia na rede e apenas actualiza o(s) nó(s) que podem sofrer alterações, avisando-os através de mensagens RERR (*Route ERRor*);
- As mensagens *Hello*, que são responsáveis pela manutenção das rotas, são limitadas para que não se crie *overhead* desnecessário na rede.

2.3.2.2 OLSR

O protocolo OLSR (*Optimized Link State Protocol*) é um protocolo proactivo com encaminhamento ‘*link-state*’, o que significa que mantém a tabela de encaminhamento actualizada com todas as rotas possíveis, o que faz com que as rotas estejam imediatamente disponíveis quando necessárias, ao contrário dos protocolos reactivos. Portanto, sempre que existe uma alteração na rede, a disseminação das modificações pode ser feita de forma quase instantânea, uma vez que são conhecidas todas as rotas. Porém, de modo a evitar a ocorrência de *flooding* na rede com informações redundantes enviadas por todos os nós, existem os MPRs (*Multipoint Relays*) que se encarregam dessa disseminação. Reduzindo o tempo de intervalo entre as mensagens de controlo pode-se melhorar a resposta às diferenças topológicas que vão surgindo na rede, com o problema de se aumentar o *overhead*. As principais vantagens da utilização do OLSR são descritas em baixo [53]:

- Não necessita de nenhum sistema central administrativo para garantir o processo de encaminhamento;
- A característica proactiva permite que o protocolo tenha acesso à informação de toda a rede. No entanto, existe o inconveniente do facto de todos os nós terem de enviar para toda a rede a actualização da sua posição, aumentando, assim, a

utilização da largura de banda. De notar que existem MPRs que diminuem o *flooding*;

- A reactividade do protocolo pode ser configurável através do ajuste do intervalo de tempo entre as mensagens *Hello*;
- Devido à simplicidade do uso de interface, é bastante simples a integração deste protocolo de encaminhamento em sistemas operativos diferentes, sem ser necessário alterar o cabeçalho das mensagens IP (*Internet Protocol*);
- Adequado a redes densas, onde a maior parte das comunicações está concentrada entre um grande número de nós [54];
- Capacidade de aplicação do protocolo a múltiplas interfaces [55].

No caso prático das experiências realizadas nesta Dissertação, visto que também era necessário que o protocolo de encaminhamento pudesse trabalhar em múltiplas interfaces, pelas razões mais à frente referidas (em 4.1.2), usou-se *software* livre já implementado OLSRd [56].

Segundo [53], no caso do AODV, existe um aumento exponencial de *flooding* quando é necessário procurar por rotas. No OLSR o tamanho da tabela cresce de forma não linear e o número de mensagens de controlo pode ser de tal maneira elevado que podem ocupar toda a largura de banda disponível, bloqueando os pacotes de dados. Em termos da utilização de recursos, ainda o mesmo artigo informa que o OLSR, sem dúvida alguma, é o que utiliza mais recursos nos dois casos mais propícios a cada um. Em termos de segurança, ambos os protocolos têm como principal ponto a segurança das mensagens de controlo, para no caso de algum nó enviar propositadamente informação maliciosa para a rede esta não afectar o processo de encaminhamento da rede. Portanto, ambos os protocolos deveriam usar autenticação IPsec (*Internet Protocol security*). No entanto, o AODV é o que precisa de menos protecção nas mensagens de controlo, porque apenas tem de autenticar as mensagens RREP e RERR. Já o OLSR necessita de ter segurança em todas as mensagens de controlo, sendo por isso o AODV mais flexível em termos de soluções de segurança (diminuindo também, desta forma, os recursos necessários comparativamente ao OLSR).

Em [57] foram estudados, por simulação, de forma exaustiva ambos os protocolos em ambientes urbanos sobre padrões de mobilidade realísticos, utilizando três tipos de ambiente (centro de cidade, residencial e suburbano). Os veículos são introduzidos de forma aleatória, assim como os destinos de cada um. Durante a deslocação são respeitados os limites de velocidade, ultrapassagens, semáforos, simulando de forma bastante real o que se passa em cada um dos ambientes testados. Como conclusão deste artigo, de uma forma global, é escrito que o OLSR tem um melhor comportamento do que o AODV, bem como menor *overhead*, atraso fim-a-fim e tamanho das rotas.

Definitivamente parece existir consenso em que o protocolo a ser usado deverá ser, pelo menos, para já, o OLSR (comparativamente ao AODV).

Em relação a QoS (*Quality of Service*) existem várias soluções para o encaminhamento direccionado às VANETs, mas não são claras as características específicas que deverão possuir, pelo que nenhuma apresenta um desempenho óptimo nos vários cenários de urbano e extra-urbano, isto é, com ambientes de densidade reduzida e elevada. Deste modo, em [40] foram

estudadas algumas das métricas de qualidade de serviço mais importantes, como a determinação da linha majorante da duração da ligação, a percentagem de pacotes entregues, o atraso fim-a-fim e o *jitter* (medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados) para comunicações *unicast* em ambientes urbanos e de auto-estrada. Os resultados apresentados foram suportados por simulações que tiveram como base configurações reais de uma *testbed*. Realizaram-se simulações em auto-estrada e em ambiente urbano, sempre com tráfego a fluir nos dois sentidos, onde a velocidade e a densidade dos veículos foi alterada. Concluiu-se que os valores de atraso e de *jitter* nas VANETs satisfazem os requisitos mínimos para a maioria das aplicações, enquanto a percentagem de pacotes perdidos e a duração da ligação são ambas altamente dependentes da densidade de veículos e do ambiente específico, sendo que a duração da ligação está também relacionada com as velocidades dos veículos. O artigo acaba com a conclusão que, efectivamente, as comunicações entre largas distâncias é impossível sem o uso de infra-estruturas, alertando para a urgência de se criarem protocolos de encaminhamento que se adaptem aos vários ambientes da estrada, assim como aos tipos de aplicação.

Como já foi referido (mais detalhes em 2.4), as VANETs vão permitir uma quantidade enorme de aplicações, quer ligadas à segurança, à navegação ou ao entretenimento. O trabalho desenvolvido em [58] foca-se em ambientes urbanos, onde se averiguam, através de dois modelos já conhecidos, as métricas fundamentais para o desenho de um sistema da transmissão de informação de tráfego veículo-a-veículo. Para além dos dois modelos usados, o Random Waypoint [59] (modelo que selecciona os destinos de cada nó aleatoriamente, bem como a sua velocidade) e o Manhattan Grid, realizaram também experiências com o simulador DIVERT, simulando tráfego em larga escala. Entrando em conta com a conectividade multi-salto e com a tolerância de atraso das aplicações em cenários de densidade muito reduzida, concluíram que os modelos clássicos não espelham a realidade, o que corrobora o facto de terem de ser desenhados novos protocolos específicos para as redes veiculares. O modelo Random Waypoint é também demasiado simplista para se capturar características importantes de tráfego veicular real. Em [60] foi estudado o comportamento destas redes de forma a obter mais dados que serão importantes aquando da criação de novos protocolos que terão de se adaptar aos mecanismos de transmissão. Este trabalho apresenta um modelo para os padrões de conectividade existentes na situação de uma cadeia de veículos em cenários de auto-estrada. Os autores deste artigo concluíram que, em cenários de auto-estrada, a existência de comunicação entre nós *relays* pode chegar às dezenas de segundos. Os dados presentes neste artigo certamente contribuirão para a determinação dos níveis exigidos de optimização, com o objectivo de uma adaptação total aos vários cenários encontrados neste tipo de redes.

Finalmente, como já foi retratado, as comunicações em ambiente veicular são bastantes instáveis, pois dependem dos mais variadíssimos factores, como o tipo de ambiente (urbano ou suburbano), hora do dia ou mesmo da taxa de penetração das VANETs em determinados locais. O trabalho desenvolvido em [25] pretende estudar o fenómeno verificado neste tipo de redes, bem como analisar as características de uma rede veicular. Para tal, foram usados dados empíricos recolhidos na via-rápida I-80 do estado da Califórnia. Os resultados do tempo médio de *re-healing*, através de sucessivas simulações de Monte-Carlo, mostram que, na estrada analisada, varia entre vários segundos a poucos minutos. Este problema ainda é perturbador para os protocolos *ad hoc* convencionais, como é o caso do AODV e o DSR, ou seja, redes, nós ou

agregados desconectados são um problema urgente a resolver. O mesmo artigo sublinha, também, que o uso mecanismos *store-carry-forward* pode ser uma possível solução para este problema.

2.4 Potenciais Aplicações e Serviços

As redes veiculares, devido à sua diversidade e área de exploração, apresentam uma panóplia de serviços e aplicações, quer sejam aplicados à segurança orientada ao veículo e ao condutor, quer aplicações comerciais ou mesmo de entretenimento e informação, sendo estas direccionadas aos passageiros.

Com o aparecimento de novas ideias e produtos para investir, é natural que se abram novas oportunidades, quer para os fabricantes de automóveis, quer para operadores de rede e fornecedores de serviços. Claro que, neste momento, para que haja uma penetração elevada das VANETs é necessário que cada vez mais veículos estejam preparados para comunicar através desta tecnologia. É também necessário lembrar que o investimento inicial irá ser elevado, principalmente devido à criação da infra-estrutura necessária. Contudo, existe a possibilidade de se aproveitar as torres das comunicações celulares já existentes ao longo das estradas para se instalar os equipamentos necessários.

As aplicações e serviços das redes veiculares podem, portanto, ser divididos em Aplicações de Segurança, Gestão de Tráfego Rodoviário, Conforto, Ultrapassagens Inteligentes e Localização de Veículos.

2.4.1 Aplicações de Segurança

As aplicações de segurança têm como principal objectivo evitar acidentes e, consequentemente, diminuir o número de mortes na estrada. A principal característica será a disseminação da informação o mais rapidamente possível e com segurança. Dentro das Aplicações de Segurança Pública, podem ser definidos dois tipos [17]: Aviso de Anti-Colisão e Mensagem de Aviso de Emergência.

2.4.1.1 Aviso de Anti-Colisão

Aviso de Anti-Colisão (CCA – *Cooperative Collision Avoidance*) tem como grande objectivo evitar colisões em cadeia ou colisões provocadas, por exemplo, por mudanças de faixas em auto-estradas, ou mesmo evitar as colisões frente-a-frente em cenários urbanos e suburbanos. Os veículos poderão automaticamente parar se receberem uma mensagem de colisão ou na percepção de uma colisão diminuir rapidamente a velocidade dos veículos vizinhos. No entanto, para que estes serviços funcionem de forma rápida e sem problemas, a latência das mensagens terá que ser baixa. Segundo os autores de [61], este tipo de aplicações terá que ter uma latência inferior a 100ms de forma a evitar colisões em cadeia.

Nos cenários de auto-estrada com várias faixas em hora de ponta, milhares de veículos têm que ser informados da colisão num curto período de tempo em caso de acidente. No caso de colisão, novamente segundo [61], a informação irá ser transmitida aos veículos mais próximos, pois apenas estes é que necessitam de saber, garantindo também assim uma latência baixa.

Nos cenários em que existe apenas uma faixa para cada sentido, a maioria dos acidentes dá-se, como já foi mencionado, por choque frontal. Nesta situação, o número de veículos é bastante inferior ao da auto-estrada; no entanto, o facto de os veículos circularem em sentido contrário, leva a que as velocidades relativas possam ser bastante elevadas e, assim, a propagação da mensagem ter que ser também difundida de forma rápida.

Entre 2000 e 2009, só em Portugal houve 386.478 acidentes de viação, 513.871 feridos e 11.366 mortos [62]. É um facto que em grande parte dos veículos de gama elevada, e alguns de gama baixa, já começam a aparecer de série sistemas de travagem automática quando detectam que existe um obstáculo em frente do veículo e o condutor nada fez para reduzir a velocidade. Porém, com as VANETs é possível partilhar muito mais informação e a longas distâncias.

2.4.1.2 Mensagem de Aviso de Emergência

Mensagem de Aviso de Emergência (EWM – *Emergency Warning Message*) tem como objectivo enviar mensagens de aviso depois de existir um acidente, ou informar acerca de condições perigosas na estrada. Este tipo de aplicações começou a ter grande atenção devido ao facto de serem fáceis de implementar com as tecnologias de acesso actuais. Imaginando que existe um acidente em determinada zona ou obras na estrada, e estas serem difundidas para a rede, é possível que a rota planeada pelos veículos perto da zona afectada seja modificada para que os condutores cheguem ao destino de forma mais rápida, sem *stress* ou necessidade de passar os limites de velocidade e, assim, poderem chegar no tempo previsto.

As Mensagens de Aviso de Emergência podem ser divididas em duas categorias: EWM Instantânea e EWM Permanente.

2.4.1.2.1 EWM Instantânea

A EWM instantânea deverá disseminar a informação para a zona de relevância (ZOR). Um exemplo desta aplicação é enviar uma mensagem de aviso quando, por exemplo, os sensores instalados no veículo notam que existe uma quebra repentina de velocidade, o que indica que, provavelmente, existirá perigo mais à frente. Quando a mensagem é disseminada, é natural que veículos a quilómetros de distância não recebam, numa primeira fase, a mensagem. No entanto, poderá ser usada a rede *ad hoc*, onde o envio da informação irá ser feito de forma selectiva segundo um algoritmo usualmente já proposto ([63] e [64]). Como já foi referido, o uso das estações celulares é viável em situações de pouca densidade de veículos, mas para grandes densidades poderá ser um problema por não estarem preparadas para grandes fluxos de tráfego. Por outro lado, também a latência associada a este tipo de comunicações é impeditiva para alguns tipos de aplicações.

2.4.1.2.2 EWM Permanente

A EWM Permanente tem como objectivo avisar os outros condutores acerca de acidentes ou condições perigosas ao longo da estrada, durante um longo período de tempo. Este tipo de mensagens ficará na zona de relevância e todos os novos veículos que entrarem nesta zona deverão receber a mensagem de aviso (Figura 6). Algumas situações perigosas poderão ser detectadas com a ajuda de uma câmara na frente do veículo que poderá detectar acidentes ou árvores caídas na estrada (outras aplicações possíveis, através das câmaras instaladas nos veículos, em 2.4.4 e 2.4.5).

Segundo o documento [65], no início a mensagem é entregue a todos os veículos que se encontram na ZOR usando, para tal, um algoritmo de *geocast* (disseminação numa determinada região, mais informações em [66]). De seguida, os veículos que têm em posse esta informação deverão detectar os novos veículos que entrem na zona e disseminá-la.

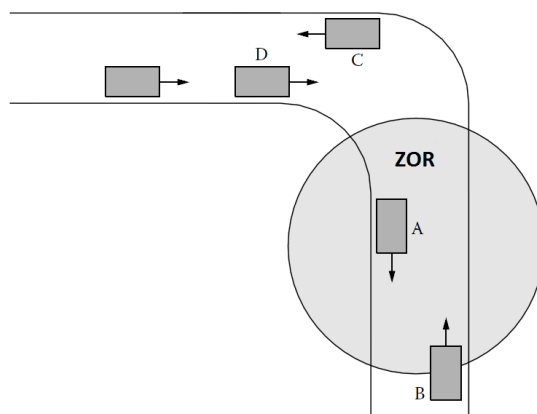


Figura 6 – Geocasting Permanente [17]

O grande problema com este tipo de aplicações, que deverão ser permanentes, é o facto de, em determinados casos, haver poucos veículos (por exemplo, durante a noite). O que é proposto em [67] é que nestas situações haja suporte via infra-estrutura: o veículo que se apercebe de tal perigo/situação avisa o sucedido para uma estação base da zona ou perto desta que, de seguida, irá ter como função disseminar a informação para todos os outros veículos que se encontrem a aproximar-se do local. A localização baseada em encaminhamento *multicast*, também conhecido como Geocasting [68], é adequada para esta situação. A decisão de que irá receber estes dados não será baseada nos seus endereços, mas sim noutros parâmetros, como a localização, velocidade ou direcção. Em situações de segurança pública, por exemplo, o *geocasting* poderá ser uma boa solução de forma a continuar a permitir baixas latências na comunicação. Em auto-estradas e em horas de ponta, se todos os veículos fizessem reencaminhamento da informação, a quantidade de tráfego na rede é elevado, provocando congestionamento da mesma (*broadcast storm*). Desta forma, cada veículo irá, de forma inteligente, decidir a quem é que irá entregar a informação. Veículos perto do veículo fonte podem, por exemplo, cancelar os seus envios ao verificarem que existe já um veículo à frente a retransmitir a informação.

2.4.2 Gestão de Tráfego Rodoviário

A aplicação de gestão do tráfego rodoviário tem como objectivo principal diminuir o congestionamento dos tempos de viagem. A principal diferença entre esta aplicação e as de segurança é que estas últimas têm grandes requisitos de latência, pois comunicações atrasadas ou perdas podem resultar em colisões. Desta forma, a gestão de tráfego não tem tanta restrição ao nível dos atrasos. O propósito desta aplicação é informar o estado do trânsito na área ou em determinada zona (por exemplo, cruzamentos) e, sendo assim, é tolerável que a informação demore um pouco mais de tempo a chegar.

Segundo [17], a Gestão de Tráfego Rodoviário pode ser dividido em duas categorias: Monitorização de Tráfego e Assistência em Intersecções.

2.4.2.1 Monitorização de Tráfego

A aplicação de monitorização de tráfego pode fornecer grandes vantagens para os condutores, no entanto, para os estudos realizados assume-se que todos os veículos estão equipados com um sistema de navegação. É comum assumir-se também que todos os veículos possuem sensores que permitam a colecção de alguns dados, como por exemplo, a velocidade. Assim, a cada intervalo de tempo pré-determinado, os veículos enviam o seu registo de velocidade associado ao segmento de estrada actual para todos os veículos dentro da ZOR, que poderá ir até alguns quilómetros. Os veículos ao receberem a informação irão guardar numa tabela os valores dos vários segmentos de estrada. Deste modo, os dados poderão ser processados e serem aproveitados em futuras decisões do equipamento de GPS, ou então para simples informação ao condutor.

É claro que as mensagens deste tipo de aplicação podem ser enviadas via *multihop* ou por infra-estrutura (no caso de *multihop*, poderá ser usado o protocolo de *geocast* [69]). Actualmente, alguns sistemas de navegação mais avançados já contêm este tipo de informação acerca de acidentes e de obras na estrada. Porém, e segundo [70], estes sistemas já existentes podem ser melhorados para também incluir informações sobre os veículos. No entanto, terá que se ter sempre em conta a prioridade dos dados: em caso de congestionamento, os dados de segurança terão que ser mais prioritários que os de monitorização de tráfego.

Contudo, [17] refere que existem alguns artigos publicados em [71], [72] e [73] que sugerem outro algoritmo de disseminação. O algoritmo sugerido não é um multi-salto verdadeiro. O que sugerem é que, a determinados intervalos regulares, cada veículo envia para *broadcast* (*single-hop*) a sua tabela para os seus vizinhos. Na referência [73] é feita uma comparação entre o algoritmo proposto e o de *geocast*. No artigo é assumido que a importância acerca da informação sobre o tráfego vai decrescendo à medida que a distância vai aumentando. No final do artigo é concluído que, para redes pequenas, o algoritmo proposto por eles obtém melhores resultados que o de *geocast*.

2.4.2.2 Assistência em Intersecções

A aplicação de assistência em intersecções foi pensada para evitar a quantidade de acidentes que existem em cruzamentos, envolvendo apenas veículos ou também peões. Este tipo de aplicações ainda se encontra um pouco embrionária, pois prevê-se que estas poderão comunicar com os semáforos de forma a otimizar o tempo de espera de cada semáforo [74].

O próprio projecto DRIVE-IN quer ir ainda mais à frente, pois pretende a migração dos semáforos actualmente existentes para semáforos virtuais que são transportados e implementados nos próprios veículos [75]. Claro que, para um sistema destes funcionar, todos os veículos teriam de ter este sistema implementado, por isso esta terá de ser feito de forma gradual. Com a comunicação veículo-a-veículo, e estando os veículos ao aproximar-se de uma intersecção, é possível verificar se há conflitos de cruzamentos na intersecção e, no caso de existirem, criar semáforos virtuais. Neste caso, haverá um veículo que irá comandar essa intersecção: este funcionará como uma infra-estrutura temporária de réplica do semáforo, enviando, para os veículos que se aproximam do cruzamento, a informação da cor que lhes foi fornecida, sendo que os condutores têm acesso a essa informação dentro do próprio veículo. Se todos os veículos usassem semáforos inteligentes na cidade do Porto, segundo os resultados das simulações realizadas na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, o fluxo de trânsito poderia registar melhorias de, aproximadamente, 60%.

Para finalizar, falta referir que algumas *testbeds* foram já concebidas com vista ao aprofundamento deste assunto, pelo que poderão ser consultadas em 2.7.1.

2.4.3 Conforto

Este tipo de aplicação está, efectivamente, mais virado para o conforto dos passageiros, embora possa ter algumas informações interessantes para o próprio condutor.

As aplicações de conforto possibilitam, por exemplo, a visualização de ficheiros multimédia, como DVDs, VOD, músicas, livros áudio, notícias ou mesmo filmes gravados em casa que poderão ser transferidos para ser visualizados no veículo. Depois de todos os vídeos e/ou músicas estarem no veículo, também é possível a partilha dos mesmos para um veículo vizinho. Para além destas possibilidades, também há a hipótese de ver hotéis e restaurantes que se encontrem no caminho, acompanhado de algumas características. Analogamente será possível receber informação acerca de bombas gasolina e até ter uma comparação de preços ao longo das várias gasoleiras.

Dentro desta área foram realizados alguns estudos dos quais se destaca o estudo presente no artigo [76], onde os autores testam a possibilidade de um tipo de aplicação nas VANETs: os jogos multijogador. Estes podem ser divididos em duas categorias: jogos multijogadores direccionados à Internet ou a equipamentos móveis (como telemóveis ou *smarthphones*). A visão dada no artigo é que este tipo de jogos, aplicado às redes veiculares, pode contribuir para a experiência dos utilizadores, permitindo-lhes que os jogos tenham características da sua localização, “misturando-os” com a realidade. Estes jogos terão vantagens relativamente aos jogos desenvolvidos para estes dispositivos pelo facto de não terem limite de bateria, nem estarem tão limitados em termos de capacidade computacional e de

processamento, podendo ser assim mais elaborados. Desta forma, numa fase inicial, foram analisados os dados empíricos disponíveis nas viagens e volume de tráfego presentes nos Estados Unidos da América e, de seguida, apontaram os desafios mais importantes que devem cumpridos de forma a permitir a realização de jogos através das VANETs. Esta análise permite ter alguma informação acerca da possível audiência neste tipo de jogos, conectividade em mundo real e duração da conectividade entre os veículos. Assim, foram realizadas simulações que determinam as características da qualidade de serviço necessárias a uma boa implementação. No final do documento, ao reconhecerem os desafios e as oportunidades deste tipo de ambientes, é apresentado um novo paradigma para os jogos em VANETs que se adapta às restrições deste ambiente e faz uso das suas características dinâmicas inerentes.

2.4.4 Ultrapassagens Inteligentes

Outra aplicação possível é a transmissão de vídeo em tempo real para auxílio nas ultrapassagens a veículos longos/pesados com pouca visibilidade, como, por exemplo, autocarros ou camiões. Hoje em dia é cada vez mais vulgar os veículos possuírem câmaras de pára-brisas para, por exemplo, lerem os sinais de trânsito e mostrar essa informação digitalmente ao condutor, podendo até fazer uma comparação entre a velocidade instantânea do veículo com o sinal lido. Se se juntar esta nova capacidade de visão por parte dos veículos às comunicações veículo-a-veículo, será possível pedir o acesso à câmara do veículo da frente: o equipamento, através do monitor instalado no nosso veículo, consegue fornecer a informação visual do troço de estrada bloqueado pelo veículo da frente, aumentando a possibilidade de existir uma ultrapassagem com segurança, tornando assim o veículo da frente “transparente” [77].

2.4.5 Localização de Veículos

Com uma rede veicular já bem implementada, e através da câmara de pára-brisas referida anteriormente, numa situação em que seria necessário encontrar um veículo de determinada matrícula, seria possível disseminar uma mensagem por toda a rede e, com a ajuda deste equipamento, conseguir-se encontrar o veículo procurado por reconhecimento da matrícula. Posteriormente, o veículo que o encontra pode reportar a localização através de coordenadas GPS, chegando a informação às entidades competentes.

2.5 Segurança na Rede

O tema da segurança é um dos mais importantes das redes veiculares, pois se os utilizadores não acreditarem na segurança dos seus dados, a penetração rápida das VANETs pode ficar comprometida. Em determinadas situações, há a possibilidade de os nós serem “egoístas” e não fazerem *forwarding* das mensagens, ameaçando a segurança das comunicações e o número de mensagens entregues. Estes comportamentos devem-se, principalmente, pelo facto de se

querer conservar energia e largura de banda. Consequentemente, [18] aconselha que sejam criados protocolos que impeçam que isto aconteça.

No tema da segurança das VANETs, alguns trabalhos têm sido realizados de forma a ser possível proteger a rede contra possíveis *hackers* e de forma a assegurar a segurança das transmissões efectuadas entre os veículos ou no pagamento de portagens electrónicas, ou seja, é necessário uma rede veicular segura que esteja preparada para as diversas adversidades que irá ter de se combater. Em [78] são discutidos os vários tipos de problemas e desafios, bem como é feita uma análise de possíveis soluções com o fim de resolver os problemas mencionados. Os requisitos mínimos defendidos são: autenticação, privacidade, integridade dos dados, confidencialidade e *overhead* reduzido. Em [79] é proposta uma plataforma que analisa a segurança de transmissão. Combinando múltiplos modelos de análise, cada veículo terá um estatuto de confiabilidade que poderá ser trocado com outros veículos, criando assim um nível de reputação. Com base nestas informações, os veículos poderão ser classificados como de confiança, pouco seguros ou neutros. As aplicações, por exemplo, podem tomar essa classificação de confiança em consideração, a fim de reagir adequadamente às informações recebidas. Por sua vez, em [80] é testado o desempenho das comunicações com protocolos de segurança. De forma a realizarem testes em larga escala, foi criado um simulador próprio (com mobilidade real de veículos), que pode albergar muito mais veículos que o simulador NS-2. Aqui são testados dois mecanismos de segurança, mostrando as vantagens e as desvantagens de cada um, baseando-se no número de pacotes entregues e na latência dos pacotes enviados em *broadcast*. Finalmente, em [81] é apresentada uma plataforma que gera mensagens seguras para *broadcast*. Os autores desenharam a arquitectura para as OBUs e implementaram-na em dois veículos. As mensagens contêm informação de aviso de violação de sinais de trânsito, aviso de velocidade elevada em curvas apertadas, aviso de travagem de emergência, aviso pré-colisão e avisos de mudanças de faixa.

2.6 Modelos Teóricos para Redes Veiculares

Ao longo da Dissertação, vários modelos teóricos foram utilizados na simulação de algumas experiências [3], de forma a haver uma comparação entre resultados experimentais e resultados analíticos. Esta secção tem como função resumir e explicar os modelos utilizados.

2.6.1 Linha de Vista

Antes de se realizar quaisquer experiências, é importante obter alguns valores teóricos acerca da distância de comunicação possível a determinada frequência e potência de saída. Para obter estes valores baseámo-nos na Fórmula de Friis ou o modelo Two-Ray (ou uma combinação destes) que permite o cálculo dos valores teóricos de comunicação em situações de linha de vista e em condições de espaço livre. Nas próximas subsecções irão ser explicadas as diferenças entre as duas formas de o calcular.

2.6.1.1 Fórmula de Friis

A Fórmula de Friis (equação (1)) é uma equação matemática que permite estimar o alcance de comunicação, tendo por base os ganhos das antenas, a potência de saída e a frequência usada, entre outros factores.

A Fórmula de Friis é definida do seguinte modo:

$$P_T = P_{IN} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \times G_T G_R \text{ [Watt]} \quad (1)$$

onde,

- R: Distância de transmissão ou alcance (metros);
- λ : Comprimento de onda;
- $\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$: Factor de perdas em espaço livre;
- P_{IN} : TxPower do dispositivo sem fios que transmite dados (Watt);
- P_T : TxPower do dispositivo sem fios que recebe dados (Watt);
- G_T : Ganho da antena da placa que transmite os dados (dB);
- G_R : Ganho da antena da placa que recebe os dados (dB).

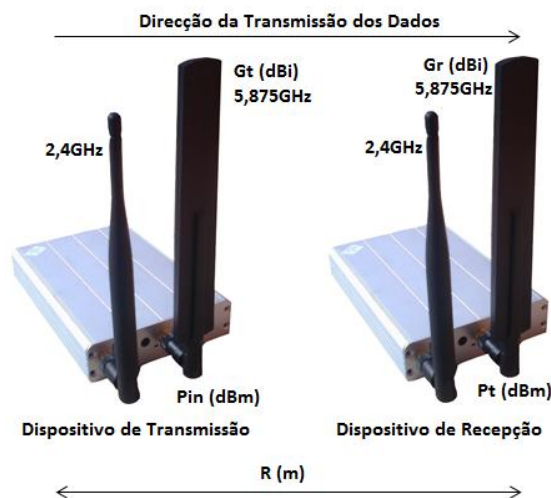


Figura 7 – Esquemático Fórmula de Friis

Sabe-se ainda que:

- $\lambda = \frac{c}{f}$, onde c é a velocidade do som (m/s) e f a frequência (em Hz);
- A conversão de Watt para dBm é dada pela seguinte expressão:

$$dBm = 10 \log_{10}(W \times 1000)$$

Substituindo os dois pontos anteriores na equação (1) e resolvendo-a em ordem a R:

$$R = \frac{c}{4\pi f \sqrt{\frac{10^{0.1P_T}}{10^{0.1P_{IN}} G_T G_R}}} [m] \quad (2)$$

Os valores de potência entregue para vários pontos definidos podem ser calculados pela equação anterior, sendo que a frequência encontra-se em GHz.

2.6.1.2 Modelos Two-Ray e Free-Space

Segundo [3], comparativamente ao que foi apresentado na subsecção anterior, o modelo Two-Ray considera outro tipo de factores, como uma reflexão no chão, criando o efeito de múltiplos caminhos [82], factor este que o modelo de Friis não contempla. A implementação realizada em NS-3 utiliza os dois modelos e uma distância de *crossover*.

A combinação entre os dois modelos apresentados é conseguida através de uma definição de uma distância de *crossover* C_x (definida na equação (3)), onde h_t e h_r são, respectivamente, a altura do transmissor e do receptor, onde λ é o comprimento de onda.

$$C_x = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (3)$$

Nos cenários simulados, o modelo Free-Space é usado para distâncias de valor abaixo da distância de *crossover*, enquanto o modelo Two-Ray é usado para valores acima desta distância. O uso destes dois modelos implica que o receptor esteja a um campo distante da antena transmissora, que pode ser calculado pela equação (4), onde D é a maior dimensão física da antena e $\lambda = \frac{c}{f}$, onde c é a velocidade da luz e f a frequência de operação. Usando $d = 0.256m$ e $\lambda = 0.051m$ para a frequência de 5.9GHz, o campo distante da antena é $d_f = 2.57m$. A distância de *crossover* é $C_x = 650.97$, considerando $h_t = 1.515 + 0.128 = 1.643m$ e $h_r = 1.480 + 0.128 = 1.608m$ (alturas dos veículos usados).

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4)$$

Dado que os transmissores e receptores estão separados por mais de um campo distante e que $d_f \gg D$ e $d_f \gg \lambda$, o modelo Free-Space pode ser aplicado. Na equação (5) encontra-se a expressão em dB.

$$P_R = P_T + 20\log \frac{\lambda}{4\pi R} + G_T + G_R [dB] \quad (5)$$

De forma semelhante, usando o modelo Two-Ray, a potência recebida pode ser calculada por:

$$P_R = P_T - (40 \log R - (G_T + G_R + 20 \log h_t + 20 \log h_r)) \quad (6)$$

Os resultados da aplicação e da combinação destes dois modelos apresentados, variando a distância entre o transmissor e o receptor, são apresentados nas figuras dos resultados no capítulo 4 (em conjunto com as experiências reais para uma melhor análise), onde o modelo Free-Space é aplicado para distâncias pequenas e o modelo Two-Ray para distâncias maiores. Estes dois modelos permitem obter as distâncias de comunicação da Tabela 3 (mesmo assim bastante superiores ao verificado nos testes experimentais).

Tabela 3 – Alcance de Comunicação com a combinação dos modelos Free-Space e Two-Ray (fonte: [3])

TxPower P_T (dBm)	Range (m)
18	1722 – 2168
23	2296 – 2890

2.7 Testbeds e Projectos Relacionados

Muitos testes em “mundo real” foram e são realizados por forma a testar-se as potencialidades das VANETs, bem como encontrar possíveis limitações, problemas e respectivas soluções. Todos estes ensaios realizados são cruciais, pois é a melhor forma de testar os ambientes únicos e extremamente dinâmicos, característicos das VANETs.

Nesta secção são identificadas as *Testbeds* com maior relevância, assim como alguns Projectos Relacionados.

2.7.1 Testbeds

A Cabernet [83] foi implementada em Boston num total de 25 táxis, com disseminação da informação entre os condutores. Apesar de ser um trabalho interessante feito nas redes veiculares tem um problema, logo de início, devido à utilização da norma IEEE 802.11b/g, ao contrário da norma 802.11p, o que dificulta a comparação deste teste com as correctas implementações das VANETs. A SUVnet [84] foi uma *testbed* realizada em Shangai, que incluía 4000 táxis, estando todos eles equipados com GPS e equipamentos com a norma IEEE 802.11 (a norma utilizada não é referida). Num dos trabalhos realizados, os autores propõem um novo protocolo de encaminhamento para VANETs. A CarTel [85] é uma *testbed* implementada em Seattle (Estados Unidos da América) incluindo apenas 6 veículos, mas que no entanto esteve a armazenar dados durante um ano. Os seis veículos estavam equipados com vários sensores, Bluetooth e equipamentos rádio com a norma 802.11b de forma a recolher dados continuamente relativos às implementações Wi-Fi na área metropolitana. A C-Vet [86] é uma *testbed* desenvolvida no campus da UCLA (Universidade da Califórnia, Los Angeles) que engloba 60

veículos, onde a comunicação é feita através de uma rede em malha Open-WRT [87], disponível em toda a área de operação, onde o núcleo da rede usa a norma IEEE 802.11a, enquanto que o serviço de acesso é oferecido pela norma IEEE 802.11g. Finalmente, o projecto DRIVE-IN [2], onde se enquadra esta Dissertação, encontra-se neste momento com uma *testbed* com 465 táxis na cidade do Porto. Todos os veículos actualmente estão equipados com uma unidade capaz de comunicar, via 3G (V2I e I2V), com uma central, conjuntamente com um *carPC* e equipamento GPS. Toda a interacção com o equipamento montado em cada veículo é feita através de um ecrã sensível ao toque, dando desta forma acesso a toda a informação disponível para o condutor, neste caso, ao taxista. Num futuro próximo, todos os veículos terão unidades equipadas com a norma IEEE 802.11p (em implementação no Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro), sendo o grande objectivo desta *testbed* fornecer resultados, a toda a comunidade, dos mais variados cenários em mundo real, utilizando para tal dispositivos flexíveis e extremamente configuráveis que podem ser usados em testes de novos protocolos em ambientes urbanos do mundo real.

Para além dos *testbeds* reais e em larga escala descritos acima, existem outros investigadores que apostam a sua investigação e o seu trabalho a experiências mais isoladas de forma a avaliar o comportamento das VANETs em situações específicas e controladas. É o caso do trabalho descrito em [88], onde foram realizadas medições, em auto-estradas, com um canal a 5.2GHz. No entanto, os autores de [89] apresentam diversos canais para comunicações Veículo-a-Veículo, baseado em medições realizadas na faixa dos 5GHz, com uma frequência central de 5.12 GHz. Em [90] é proposto um modelo *geometry-based* para 5.2GHz, que tem em conta diversos componentes de transmissão, nomeadamente a existência ou não de linha de vista e reflexões derivadas de objectos estáticos. Os autores de [91] apresentam um modelo realista baseado apenas no modelo *ray-tracing*, onde o realismo é obtido à custa de muito poder computacional, pelo que não é prático usar este tipo de modelo em simulações de rede em larga escala. Em [92] são fornecidas medidas para cenários sem linha de vista (NLOS – *Non-Line-Of-Sight*), principalmente para cruzamentos. Este trabalho, realizado pelo grupo de I&D (Investigação e Desenvolvimento) da BMW, levou à determinação de vários factores que influenciam as comunicações nas intersecções (como a posição dos edifícios) e concluíram, através dos dados obtidos, que em cenários sem linha de vista a troca de informação é possível e que a percentagem de pacotes entregues é maioritariamente acima dos 50% para distâncias de 50m ao cruzamento. Por fim, [93] estuda a interferência entre nós múltiplos presente nas VANETs num ambiente controlado e fixo.

2.7.2 Projectos Relacionados

A primeira investigação feita em comunicações veiculares foi conduzida pela JSK (*Association of Electronic Technology for Automobile Traffic and Driving*) no início dos anos 80, no Japão. Desde a década de 90, muitos projectos europeus têm vindo a ser desenvolvidos (suportados por fabricantes de automóveis, empresas privadas e institutos de investigação), todos com o objectivo de criar uma plataforma de comunicação para veículos. Nesta secção irão ser descritos alguns dos projectos mais recentes.

NoW (*Network on Wheels*) [94] é um projecto alemão que trabalhou, essencialmente, nas comunicações V2V e V2R baseado na tecnologia WLAN (*Wireless Local Area Network*). O principal objectivo foi o desenvolvimento de um sistema que integra quer aplicações de segurança, quer aplicações de conforto. O projecto iniciou-se em 2004 e a apresentação final deu-se em Maio de 2008, onde foi apresentada uma base técnica consolidada, que serve de grande referência para trabalhos actuais. O principal resultado terá sido mesmo a criação de um *software* que possui ferramentas que podem ser usadas para futuros testes e implementações para comunicações V2V ou V2R [95].

O projecto SAFESPOT [12] fornece sistemas de cooperação para segurança rodoviária (referido como veículos inteligentes em estradas inteligentes) de forma a prevenir acidentes rodoviários, desenvolvendo um sistema que detecta situações potencialmente perigosas com a devida antecedência, aumentando assim o tempo de resposta e a segurança. Este assistente criado é um sistema inteligente que usa comunicações V2V e V2I baseadas na tecnologia IEEE 802.11p.

COOPERS (*Cooperative Systems for Intelligent Road Safety*) [96] foca o seu desenvolvimento na inovação das aplicações de telemática com o objectivo de a longo prazo conseguir efectuar gestão de tráfego com cooperação veículo-a-veículo e a infra-estrutura instalada. COOPERS tenta assim melhorar a infra-estrutura rodoviária através de sensores e aplicações de controlo de tráfego, desenvolvendo um conceito de comunicação capaz de um bom comportamento nas principais auto-estradas europeias, com alta densidade de tráfego.

O projecto GeoNet (*Geographic Networking*) é um projecto da União Europeia [97] que se iniciou em Fevereiro de 2008 e visa implementar um sistema de referência para redes veiculares *ad hoc* utilizando, para tal, conceitos geográficos para o endereçamento, e contém uma integração de um sistema de localização geográfica com suporte à mobilidade IP, tudo com IPv6. Neste projecto um veículo é considerado uma rede móvel, onde o protocolo NEMO (*NEtwork MObility* [98]) é o responsável pela ligação dos nós à Internet: este processo é feito através de sinais enviados, de forma intermitente, para as RSUs.

Por fim, falta referir que o projecto DRIVE-IN encontra-se, neste momento, a trabalhar na finalização da implementação da norma IEEE 802.11p, para que nos próximos meses sejam instalados nos táxis equipamentos com capacidade de comunicação veículo-a-veículo.

2.8 Sumário

Neste capítulo foram apresentados os conceitos importantes para a compreensão das redes veiculares e os principais trabalhos realizados na área de investigação. Verifica-se que este tema, embora tenha começado a ser investigado há cerca de 30 anos, tem ainda muito trabalho para ser desenvolvido, onde se destaca a avaliação do desempenho, das características e dos limites das VANETs em situações reais. A segurança e a implementação de um protocolo de encaminhamento dinâmico/geográfico também são dois factores importantes a ter em consideração. Como foi mencionado, existem muitos trabalhos realizados, e alguns ainda se encontram a decorrer, mas muito poucos usam a norma IEEE 802.11p como referência. O projecto desenvolvido no DRIVE-IN diferencia-se dos restantes, não só por trabalhar com a norma específica para redes veiculares, mas por usar equipamento de código aberto (*software* livre),

facilitando o desenvolvimento de aplicações (mais flexíveis e configuráveis), e por pretender criar uma *testbed* em grande escala, já a partir de Setembro de 2011. Por fim, foram também apresentados os modelos analíticos usados nas simulações com vista à comparação com os resultados experimentais, onde se concluiu que o modelo *Two Ray*, é a solução que melhor traduz os alcances de comunicação teóricos por entrar com vários factores importantes, como as reflexões na estrada e o desvanecimento das comunicações com o aumento da distância.

3. Desenvolvimento para Suporte da *Testbed* Experimental

Neste capítulo será apresentada toda a configuração da *testbed*, onde é descrito o material utilizado, uma breve descrição da implementação da norma IEEE 802.11p e os desenvolvimentos necessários para a realização das experiências.

3.1 Equipamento Utilizado

De forma a testar os cenários pretendidos (ver capítulo 4) e as características das redes veiculares, foi criada uma pequena *testbed* com o objectivo de avaliar o desempenho das unidades desenvolvidas a ser instaladas numa *testbed* de maior escala, com 465 táxis no Porto.

De seguida encontra-se a lista do equipamento usado, assim como a indicação do Sistema Operativo e do *driver*, e na Figura 9 é apresentado o equipamento montado e preparado para ser instalado.

- Módulo ALIX: placa principal do sistema que se pode definir como um mini-PC (*Personal Computer*). PCEngines Alix3D3, com um processador de 500 MHz AMD Geode LX800 – arquitectura 32-bits x86 [99];
- Módulo Wi-Fi preparado para a norma IEEE 802.11a/b/g, para controlo;
- Módulo Wi-Fi preparado para a norma IEEE 802.11p/DSRC - frequências entre 5.86 e 5.92GHz (Figura 8) [100];



Figura 8 – Módulo Wi-Fi com norma 802.11p/DSRC (fonte: [100])

- Cartão de memória Kingston (8GB);
- Caixa em alumínio de forma a proteger todo o *hardware* inerente;
- Antena L-Com omnidireccional com extensão e suporte magnético para frequências entre 5.150 e 5.9GHz de 5dBi, norma IEEE 802.11p – usado nos veículos [101];
- Antena para frequências entre 5.1 e 5.9GHz de 9dBi, norma IEEE 802.11p – usados nas RSUs;

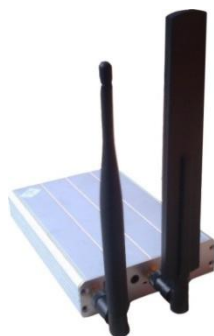


Figura 9 – Placa para uso veicular

- Antena de controlo à frequência 2.4GHz de 5dBi, norma 802.11a/b/g [102];
- GPS GlobalTop (MediaTek MT3329);
- Sistema operativo Linux Debian ‘Squeeze’, versão do *kernel*: 2.6.32-5-486 [103];
- *Driver* ath5k, baseado na versão ‘compact-wireless-2010-11-01’, modificado [104].

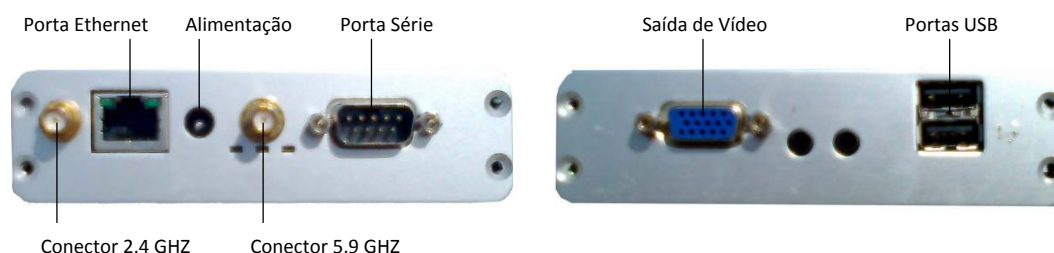


Figura 10 – Descrição dos conectores disponíveis

Na Figura 9 é mostrado o equipamento final para uso veicular e na Figura 10 são apresentados os vários conectores disponíveis em cada placa. Num dos lados tem-se acesso a dois conectores para se ligar as duas antenas (norma *g* e *p*), uma porta Ethernet, um conector para alimentação (isqueiro ou bateria) e uma porta série (RS-232), que é usada para ler os valores vindos do GPS. Do outro lado temos uma saída de vídeo e duas portas USB (*Universal Serial Bus*).

Para a realização das experiências em estrada foram necessários sempre, pelo menos, dois veículos: os veículos usados para os cenários deste documento foram um Toyota Auris (5 Portas) e um Kia Cee'd Scoupé (3 Portas). Teve-se em atenção o uso de veículos de porte idêntico, diminuindo, desta forma, fontes de erro devido às diferentes estruturas dos veículos (Figura 11). As antenas foram colocadas inicialmente dentro dos veículos, mas verificaram-se perdas significativas, portanto, todos os testes presentes nesta dissertação foram feitos com as antenas colocadas no centro do tejadilho do veículo (ver Figura 12 e 3.4.1). Esta decisão teve também por base a existência de vidros atérmicos que começam a aparecer nos veículos novos, que diminuem de forma abrupta a potência do sinal.

Relativamente às RSUs, estas foram montadas num tripé na berma da estrada, utilizando como energia uma bateria (Figura 13).

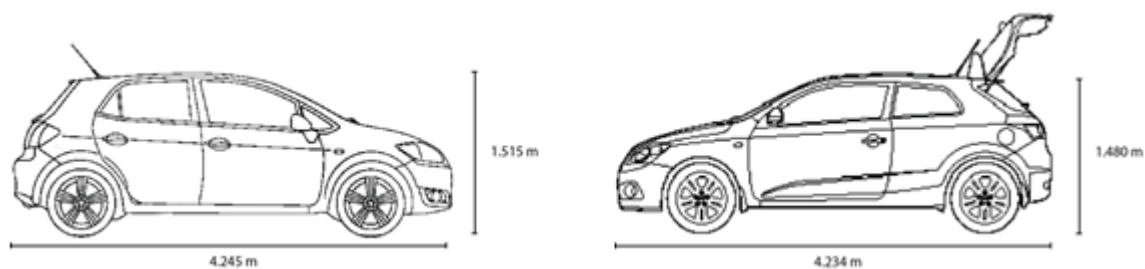


Figura 11 – Toyota Auris (à esquerda) e Kia Cee’d Scoupé (à direita) (fonte: [105] - adaptado)



Figura 12 – Equipamento instalado no veículo



Figura 13 – RSUs

3.2 Potências de Saída e Norma IEEE 802.11p

De modo a preparar a *testbed* e ser possível realizar as experiências pretendidas, foi necessário modificar os *drivers* do sistema operativo para que fosse possível trabalhar com a norma IEEE 802.11p, bem como verificar qual o TxPower real aos terminais da antena.

É importante referir que o TxPower definido na placa e o de saída são naturalmente diferentes devido, em grande parte, à atenuação do cabo de extensão que permite que a antena seja posta no tejadilho do veículo, e também pela capacidade de precisão da própria placa (que, como se irá verificar, mesmo à saída desta, o TxPower medido é significativamente abaixo do definido). Das medidas realizadas no Laboratório de Medidas do IT, foi possível preencher a Tabela 4. Estas medidas são importantes para a inclusão destes valores nos modelos analíticos,

para que as simulações realizadas sejam as mais parecidas possíveis com as medições realizadas em estrada.

Tabela 4 – TxPower Definido vs. TxPower Medido

Definido	TxPower (dBm)	
	Medido (saída da placa)	Medido (com cabo de extensão)
3	-1,62	-5,32
4	-0,79	-4,49
5	0,22	-3,48
6	1,65	-2,05
7	2,92	-0,78
8	3,15	-0,55
9	4,5	0,8
10	5,38	1,68
11	5,72	2,02
12	8,91	5,21
13	11,17	7,47
14	12,85	9,15
15	13,64	9,94
16	14,39	10,69
17	14,89	11,19
18	16,21	12,51
19	17,44	13,74
20	18,05	14,35
21	18,07	14,37
22	18,28	14,58
23	18,28	14,58
24	17,7	14

Na Tabela 4 apenas se encontram valores superiores a 3dBm pelo facto das placas usadas apenas terem precisão acima do valor de 2.5dBm. Ao longo do restante documento, o TxPower referenciado será sempre em relação ao valor definido. Apenas uma referência para o facto de a placa começar a saturar a 24dBm, tendo um alcance inferior relativamente à potência de 23dBm.

De seguida alterou-se o *driver* ath5k de código aberto da *Atheros*, adaptando-o às normas europeias para que a comunicação se desse à frequência de 5.9GHz, operando sempre dentro das regulamentações previstas. Esta implementação não foi realizada no âmbito da Dissertação, mas houve um trabalho de suporte aos testes realizados. Grande parte das características da norma veicular IEEE 802.11p são idênticas à norma IEEE 802.11a, o que nos levou a implementar a norma *p*, modificando a norma *a*, como foi descrito acima. Neste sentido, o primeiro passo foi criar um modo *Half-Rate* com metade da frequência de relógio, de forma a poder acomodar o canal de largura de banda de 10MHz, contrariando o usado (20MHz) nas normas IEEE 802.11a/b/g, forçando os parâmetros usados a estar de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação de parâmetros físicos entre as normas IEEE 802.11p e IEEE 802.11a

Parâmetros	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p (modo <i>half clocked</i>)	Alterações
Bit Rate (Mbit/s)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27	Metade
Symbol Duration	4 μ s	8 μ s	Dobro
Guard Time	0.8 μ s	1.6 μ s	Dobro
FFT Period	3.2 μ s	6.4 μ s	Dobro
Preamble Duration	16 μ s	32 μ s	Dobro
Subcarrier Spacing	0.3125 MHz	0.15625 MHz	Metade

A Figura 14 mostra um analisador de sinal a uma frequência de 5.9GHz (com o *driver* modificado), onde se verifica que a largura de banda obtida é efectivamente de 10MHz. Através de um canal mais estreito, o sinal torna-se mais robusto relativamente ao *fading* (desvanecimento, perda de qualidade de sinal com o aumento da distância), permitindo um alcance de comunicação com menos perdas, beneficiando, deste modo, as aplicações de segurança, onde não será importante a quantidade de informação transmitida, mas sim o alcance; fazendo um raciocínio idêntico para as aplicações de conforto/entretenimento, uma largura de banda maior permitiria uma melhor qualidade de serviço, diminuindo a qualidade de sinal para maiores alcances de comunicação.

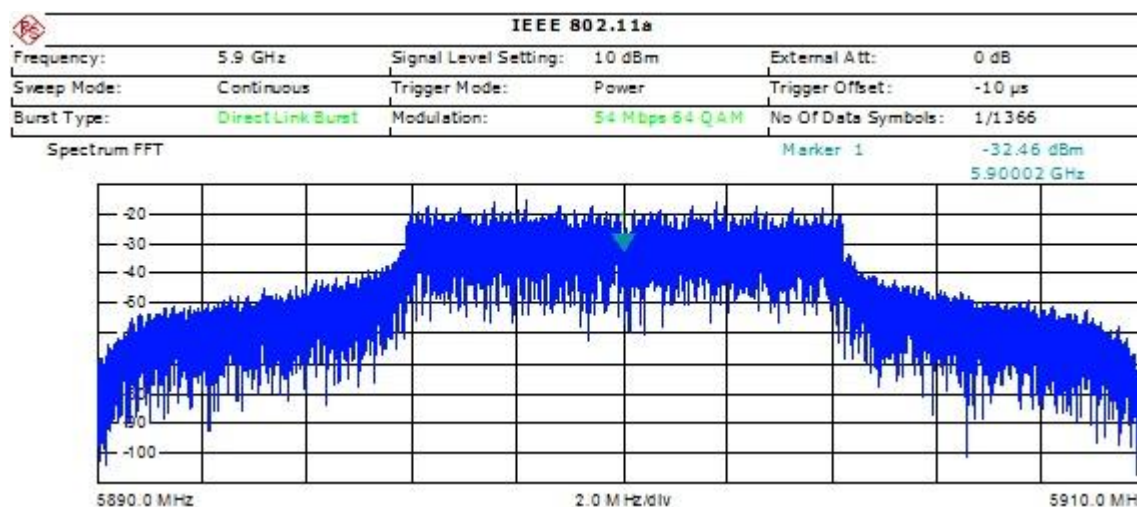


Figura 14 – Canal de 10MHz

Para além das alterações enunciadas anteriormente, foi necessário alterar outros parâmetros, que não dependem directamente da taxa de relógio, tal como o *SlotTime*, que foi alterado de 9 μ s para 13 μ s, e o SIFS, que sofreu uma alteração de 16 μ s para 32 μ s.

Por fim, para além das alterações realizadas no *driver*, foram alteradas as aplicações Linux *userspace/kernel space* de modo a ser possível restringir as larguras de banda e canais usados de acordo com a norma europeia, pois sem isso o próprio sistema iniciava sempre com o *default*, isto é, por defeito com as normas americanas, diferentes das europeias.

Falta apenas lembrar que as placas existentes implementadas com a norma IEEE 802.11p são bastante escassas e possuem um custo muito elevado, o que nos levou a utilizar um equipamento mais barato e com *software* livre.

3.3 Aplicações e Implementações

Concluída a fase de selecção do material a usar e de ter sido feita a adaptação do *driver*, de forma a respeitar a norma IEEE 802.11p (camada física), foi necessário proceder-se ao desenvolvimento de várias aplicações de raiz, para averiguar o comportamento das comunicações veiculares sem fios em determinados cenários reais. Para além do *software* base criado inicialmente, que foi melhorando, evoluindo e corrigido ao longo de todo o ano, foi necessário o desenvolvimento de alguns *scripts* para que tudo ficasse automatizado, melhorando a eficácia e o tempo da realização de cada experiência efectuada. Nesta secção 3.3 vai ser descrita toda a plataforma desenvolvida, os *scripts* usados (como foram construídos e o seu porquê) e, por fim, como foram analisados os dados após os registos obtidos.

3.3.1 Recolha de Informação

Decidiu-se que a ligação e o envio de pacotes seriam feitos através de *sockets* por UDP (*User Datagram Protocol*). A grande vantagem da utilização de *sockets* é o facto de se trabalhar em camadas superiores, sem ser necessário trabalhar directamente na camada MAC. Sendo assim, o programa desenvolvido tem o objectivo inicial de fazer uma ligação via *sockets* entre os diferentes equipamentos através de um comando bastante simples (em baixo), criado com o objectivo de se conseguir personalizar ao máximo o envio dos dados. Desta forma, é possível enviar pacotes sucessivos entre os veículos envolvidos. Adicionalmente, neste programa, foi necessário alterar um parâmetro fundamental dos *sockets* para que fosse possível um envio contínuo de pacotes para que estes não ficassem bloqueados quando não existisse resposta do servidor, pois embora os *sockets* funcionem via UDP, por predefinição precisam que o servidor esteja activo. Se tal acontecesse, o envio de dados só aconteceria com comunicação, não tendo acesso a um verdadeiro PDR (*Packet Delivery Ratio*), pois seria sempre 100%.

client-server [espaço] *IP Destino* [espaço] *nome do registo das mensagens enviadas* [espaço] *nome do registo de GPS* [espaço] *Identificador*

Com a facilidade do comando anterior, o programa realizado poderá ser usado para múltiplos fins, quer para envio em *broadcast*, quer para envio em *unicast*, sendo personalizável o nome do registo de GPS e dos dados. Para que as mensagens fossem todas identificadas de forma diferente, criou-se uma variável, *msgID*, que garante que cada pacote é único, tornando-o facilmente reconhecível mais tarde nos pacotes recebidos. No entanto, enquanto numa primeira fase havia um cliente e um servidor a trabalhar de forma independente, em que os dados apenas fluíam num único sentido, achou-se interessante numa fase posterior que o fluxo se fizesse em ambos os sentidos, tendo inclusivamente alguma vantagem, como a possibilidade de obter o dobro dos dados recolhidos em cada teste. Desta forma, temos então acesso a:

- **Informação do módulo GPS;**
- **Informação dos dados enviados;**
- **Informação enviada gravada num registo;**
- **Informação enviada para a consola.**

Este programa, para além dos comandos normais de abertura de portas e ligação entre os vários cliente-servidor, lê os dados vindos do módulo GPS a partir do interface série. Assim, no *loop* realizado pelo *software*, é feito um filtro aos vários dados do GPS, ficando apenas com a informação dada pela linha \$GPRMC (linha denominada como a informação “recomendada mínima”, que contém toda a informação necessária para o efeito, como a latitude, a longitude e a velocidade instantânea).

Relativamente à informação enviada na mensagem, existe a informação do número do pacote enviado (através do *msgID*), do tempo a que foi enviada (para obtenção do atraso, com a informação de tempo do destino) e também do *identifier* (identificador da placa). Como numa fase posterior cada placa podia enviar e receber pacotes e como todas elas criavam pacotes da mesma maneira (através de um contador que a cada ciclo vai acrescentado um valor), é natural que haja várias mensagens a ser geradas com a mesma *msgID*. A solução foi, para além da *msgID* do pacote, este ser acompanhado pelo identificador, que permite saber que determinado pacote foi gerado por determinada placa, não restando assim dúvidas acerca da origem do pacote. Falta apenas referir que a informação enviada, com o cabeçalho do protocolo, fica com aproximadamente 70bytes – configurável. Assim, o tamanho é bastante reduzido, sendo também um dos objectivos, para que fosse possível ter uma grande quantidade de pacotes por segundo, obtendo uma melhor análise por se ter uma maior quantidade de dados para analisar, diminuindo possíveis erros e aumentando, consequentemente, os intervalos de confiança.

A informação enviada para a consola em tempo real é composta pela *msgID*, pelo tempo actual e pelo IP Destino. Esta informação é importante para se ter *debug* instantâneo aquando da realização dos testes, pois é possível visualizar os pacotes a ser gerados, o tempo (pois se não houver tempo significa que o GPS ainda não se ligou aos satélites e não está a guardar, nem coordenadas, nem *timestamp*) e o destino (para se ter a certeza para qual IP se está a enviar, ou se por ventura deveria estar a enviar, por exemplo, para *broadcast*).

Por fim, a informação enviada é registada à parte num ficheiro de texto que contém o identificador, seguido da *msgID*, do tempo que foi enviado e do IP Destino (este último parâmetro não é enviado no corpo da mensagem).

Ao programa principal foi ainda adicionada uma rotina de serviço à interrupção com o objectivo de permitir que não fosse necessário reiniciar o programa sempre que se quisesse repetir o mesmo teste que tivesse as mesmas condições. Com o programa descrito atrás, é possível enviar mensagens; no entanto, falta algo que receba e decodifique as mensagens recebidas. Portanto, foi criado o *script DRIVE* que automatiza todo o processo. Com um simples comando consegue-se correr o programa de envio e o programa de recepção, mais uma vez com

o objectivo de facilitar todo o processo. Este *script* tem como parâmetros de entrada o IP Destino, o nome do teste, a potência de sinal a realizar e o identificador da placa, como é descrito em seguida.

DRIVE.sh [espaço] *IP Destino* [espaço] *nome do teste* [espaço] *TxPower* [espaço] *identificador*

Através do nome do teste e do *TxPower* combinados é automaticamente gerado o nome dos registos referidos anteriormente e chamados na função *client-server*. O espaço dedicado ao identificador e ao IP Destino foi mais tarde suprimido, estando já o programa preparado para determinados valores, para diminuir o número de parâmetros de entrada (estes eram pouco alterados). Este *script*, para além de chamar a função *client-server*, define o canal 175 (para que a frequência de funcionamento seja a correcta) e indica o *TxPower*, bem como inicia uma captura dos pacotes através do programa *tshark* (analisador de redes) [106]. Este analisador está configurado como tendo uma interface monitor de forma a ter acesso à captura de muito mais informação. Esta informação é separada por ponto e vírgula de forma a facilitar todo o processo de análise posterior, pois a informação captada por este programa é gravada em valores hexadecimais e gravado em formato de texto. Assim, os ficheiros gravados pelo *tshark* apresentam a informação sobre o próprio IP (IP Destino), a mensagem de dados (já explícita anteriormente, que contém o *timestamp*, *msgID* e o identificador), o RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*) em cada pacote e o IP Fonte, sendo todos os pacotes capturados com filtro UDP. O *tshark* tinha configurado os seguintes parâmetros, durante as nossas experiências:

```
tshark -i mon0 -T fields -nn -E separator=";" -e wlan.addr -e data.data -e radiotap.dbm_antsignal -e ip.src -f udp
```

Deste modo, a Tabela 6 resume a informação armazenada e acessível a partir dos registos de cada placa.

Tabela 6 – Dados disponíveis no Transmissor e no Receptor

Transmissor	Receptor
Número de pacotes enviados	Número de pacotes recebidos
IP Fonte e IP Destino	IP Fonte e IP Destino
<i>Timestamp</i> de saída	<i>Timestamp</i> de saída e de chegada
Identificador de cada pacote associado a uma placa	Identificador de cada pacote associado a uma placa, com respectivo RSSI
Coordenadas GPS e hora satélite ao longo do tempo	Coordenadas GPS e hora satélite ao longo do tempo

Por fim, na Figura 15 é resumido num diagrama de blocos todo o processo de recolha de informação para melhorar a compreensão de todo o processo descrito anteriormente.

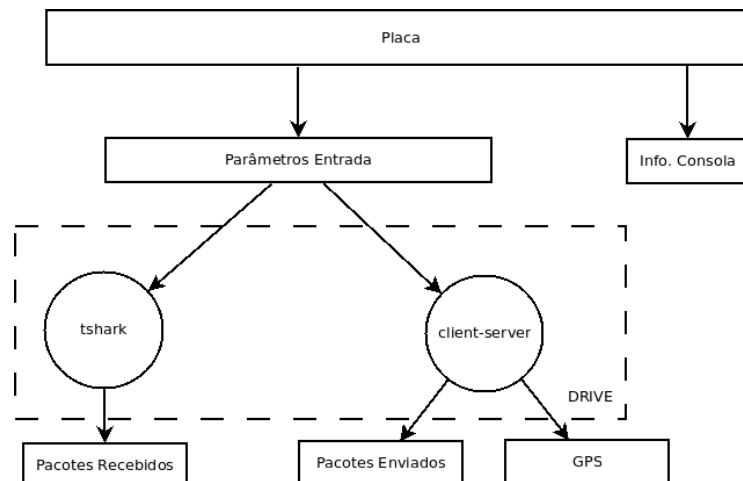


Figura 15 – Diagrama de blocos: Recolha de Informação

3.3.1.1 Buffer

Em determinadas situações, principalmente nos cenários com e sem RSUs, surgiu a questão sobre a necessidade de criar um *buffer* para que o veículo (neste caso, um *relay*) armazenasse a mensagem recebida e a enviasse, continuamente, até a entregar ao veículo Destino (mecanismo *store-carry-forward*), apenas quando este estivesse a determinada distância. O objectivo inicial era enviar, nestes cenários, um único pacote e verificar o atraso deste, aproximando-nos, assim, o mais possível à simulação realizada. Acontece que, depois de analisar melhor esta solução, a criação de um *buffer* não resolveria o problema.

Esta necessidade surgiu pelo facto de se querer comparar testes reais com testes simulados, onde na verdade não existem formas de controlar, de forma precisa, o alcance das comunicações realizadas no “mundo real”, para além de não se conseguir controlar e indicar ao programa que apenas quando estiver a determinados metros de distância, de determinado equipamento, é que poderá reenviar o pacote. Analogamente, a calibragem dos *TxPower* para uma distância de 250m nem sempre era precisa, podendo ter em determinado instante comunicação entre 260 e 240 metros, como de seguida poderia ter mais de 300m, isto devido às múltiplas reflexões possíveis neste tipo de ambientes que originam comportamentos incontrolláveis e completamente diferentes. O próprio valor de *TxPower* não permite precisão às casas decimais, pelo que dificulta também a calibração. Portanto, o *buffer* não resolvia o objectivo de guardar a mensagem e enviá-la apenas quando os veículos estivessem a 250m de distância.

Porém, acontece que o modelo usado em simulação (para o cenários específicos realizados) não entra em conta com o desvanecimento nem reflexões das comunicações, isto é, se o simulador tinha um alcance de 250m, aos 250m o PDR era de 100% e aos 251m de 0%. Para que se pudesse fazer uma boa comparação, o alcance em teste real teria que ser definido para mais de 300 metros, para que aos 250 metros ainda houvesse uma boa entrega de pacotes. O uso de *buffer* aqui era importante no caso em que, mesmo que já existisse comunicação entre os dois veículos, o *buffer* guardava a mensagem até o *relay* se encontrar a determinado alcance do veículo Destino. No entanto, esta solução apenas seria possível de se concretizar se o Destino

fosse estático e se o programa soubesse, *a priori*, as coordenadas deste, podendo calcular em tempo real a distância entre os veículos.

Neste sentido, a solução encontrada, para a realização destes cenários, foi verificar se o atraso derivado dos múltiplos saltos e o tempo de associação eram ou não desprezáveis (que se verificou que sim) e com o acesso à velocidade instantânea e à distância gravada dos módulos GPS, foi possível, através de cálculos simples, obter o acesso ao tempo com casas decimais, podendo verificar exactamente a que instante foi enviado o primeiro pacote quando os veículos se encontravam a 250m. Em particular, no caso destes cenários, todos os veículos enviaram para *broadcast* os seus dados, realizando-se, posteriormente, uma análise cuidada e devida, tendo em conta os sentidos correctos das mensagens.

3.3.2 Análise da Informação

Todo o processo descrito anteriormente está relacionado com o desenvolvimento dos vários programas para troca e recolha de dados. Esta secção dará foco à análise de toda a informação recolhida pelo equipamento e como aproveitar esta informação para ser usada noutro tipo de programas.

Depois de se ter acesso aos três registos de cada veículo (informação enviada, informação recebida e dados GPS) é necessário passar à parte de análise, filtragem e concatenação dos dados. Assim, de forma a mais uma vez automatizar todo o processo e de modo a facilitar a leitura de informação foi criado um *script* para economizar todo o processo.

Numa primeira fase, foi necessário filtrar os dados capturados do módulo GPS para que aparecessem apenas os dados referentes às linhas presentes em GPRMC, que fornecem informação sobre o tempo, altitude, longitude, latitude, velocidade e número de satélites a que se encontrava ligado. De seguida filtraram-se também os registos capturados pelo *tshark*, de forma a garantir que apenas eram contabilizados os pacotes vindos do IP Fonte definido (porque embora o envio fosse preferencialmente direccionado e não para *broadcast*, o analisador de redes comporta-se como um *sniffer*, capturando tudo o que existe à sua volta, mesmo não sendo direccionado directamente a ele).

Após esta filtragem importante, tiveram que ser realizados dois programas: um que “descodificasse” a informação em hexadecimal do *tshark* para formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), de forma a se ter uma informação mais clara, objectiva e de fácil leitura, e outro que, tendo acesso ao ficheiro de texto do GPS, concatenasse as duas informações obtidas. Como ambos se encontram sincronizados pelo mesmo relógio e o ficheiro de GPS apenas contém informação ao segundo, a procura foi efectuada ao segundo, no ficheiro do *tshark*. Foi feita a média de todos os pacotes recebidos nesse instante, alterando o valor da altitude no registo do módulo GPS para valor de RSSI de todos os pacotes recebidos nesse instante. Assim, no final de todo este processo tem-se a informação por linha ao segundo do tempo, coordenadas GPS e média de RSSI de todos os pacotes presentes naquele segundo. Para a conversão dos valores do registo de GPS em valores mais usuais, recorreu-se ao GPS Visualizer [107].

Para a obtenção dos valores de PDR, foi necessário criar outro *script* que contasse o número de pacotes existentes em cada segundo do registo dos pacotes enviados e no dos pacotes recebidos, fazendo depois uma comparação entre os dados de dois veículos e, desta forma, retirar o PDR correspondente, adicionando esta informação à anterior.

O passo seguinte a realizar é passar toda a informação adquirida para uma folha de cálculo, porque permite, para além de ter uma perspectiva geral de como correu a experiência, ter acesso a outras funcionalidades, como verificar a distância entre dois veículos, RSUs ou uma combinação destes. Usando a expressão descrita na equação (7) é possível obter a distância entre dois pontos, em metros, através das coordenadas GPS, em que as respectivas latitudes e longitudes têm de ser convertidas para radianos.

$$Dist = Radius_{Earth} \times \left(2 \sin \sqrt{\sin \left(\frac{Lat_1 - Lat_2}{2} \right)^2 + \cos Lat_1 \times \cos Lat_2 \times \sin \left(\frac{Long_1 - Long_2}{2} \right)^2} \right) \times 1000 [m] \quad (7)$$

Por fim, foi necessário desenvolver vários *scripts* em MATLAB [108] que fornecessem, de forma automática e simples, os gráficos apresentados com as respectivas legendas e intervalos de confiança a 95%.

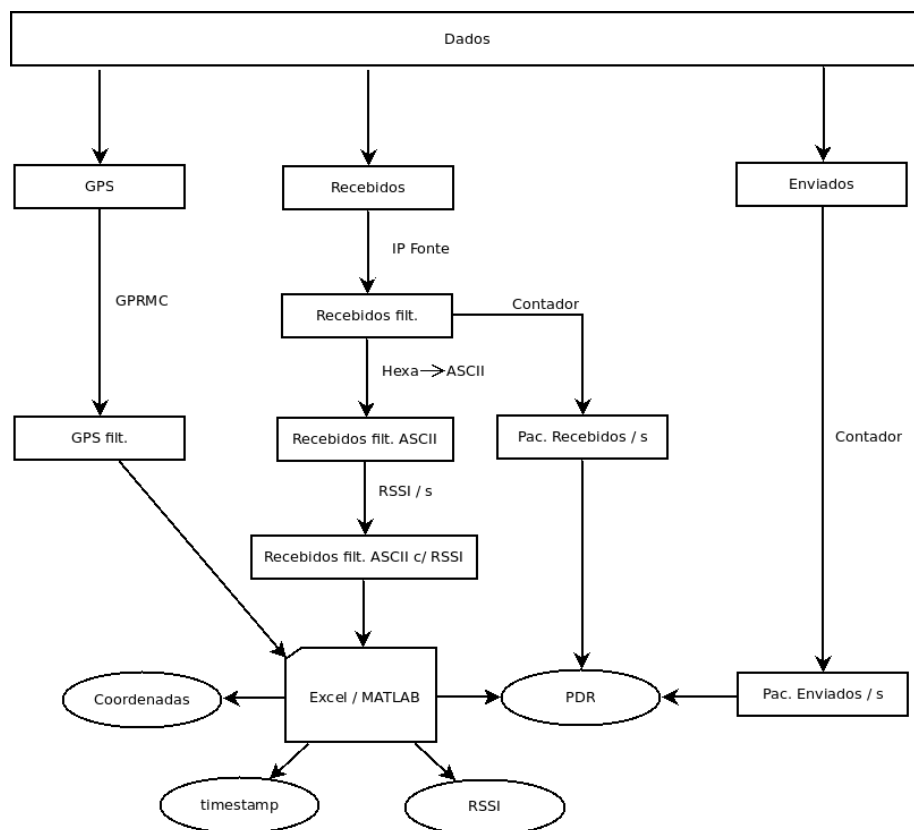


Figura 16 – Diagrama de blocos: Análise da Informação

Finalmente, na Figura 16 é resumido, mais uma vez num diagrama de blocos, todo o processo de análise da informação recolhida, com vista a simplificar a compreensão de todo o

encadeamento explicado anteriormente e facilitar o entendimento do entrelaçamento de todos os programas desenvolvidos.

3.3.2.1 Visualização dos dados no Google Earth

Depois da recolha de dados, como já foi mencionado, a forma de análise dos dados foi pensada para que estes pudessem ser usados noutra tipo de aplicações ou mesmo para melhorar a análise dos dados recolhidos, ajudando assim a perceber algum tipo de incoerência dos resultados que possa existir numa zona específica, ajudando na explicação do seu porquê. Um exemplo da aplicação passível de ser usada é o Google Earth [109].



Figura 17 – Registos aplicados no Google Earth

A Figura 17 mostra um exemplo de aplicação dos registos guardados num determinado cenário. Com a ajuda da página *web* GPS Visualizer, é possível converter os dados em formato *kmz* (formato lido pelo programa Google Earth), e desta forma acompanhar todo o percurso e ver, em tempo real, qual o valor de RSSI num determinado instante e num determinado local. O que se idealizou foi substituir o valor da altura (menos importante de todos os parâmetros disponíveis) pelo valor de RSSI recebido pelo *tshark*. Assim, é possível usar o programa da Google para este efeito, visto que ele possui um visualizador de altura. Depois de algumas alterações nas definições do programa é possível observar o gráfico demonstrado na Figura 17.

3.3.3 Transmissão de Vídeo - Análise

Relativamente à análise da transmissão de vídeo, o objectivo consiste em verificar se a qualidade de vídeo no receptor é suficiente (por exemplo, para identificação dos veículos) e se o atraso que existe entre o transmissor e o receptor é admissível. No entanto, o objectivo inicial deu lugar a um objectivo mais ambicioso, em medir, com precisão aos milissegundos, o atraso efectivo/real para o utilizador, desde que é captada a imagem até esta chegar ao veículo Destino, não medindo apenas o atraso dos pacotes na rede. Acontece que, numa primeira análise, foi usado o programa VLC para o efeito (3.3.3.1), chegando à conclusão que não era o mais indicado

para o envio de vídeo em tempo real. Depois de alguma pesquisa decidiu-se usar a plataforma livre multimédia GStreamer (3.3.3.2), verificando-se uma melhoria significativa dos resultados.

3.3.3.1 VLC

Depois de alguma pesquisa de *software* já existente, para a emissão de vídeo por rede, numa primeira fase destacou-se o programa VLC media player [110], muito popular por ser *software* livre, trabalhar em múltiplas plataformas e ser de fácil utilização. O próprio VLC fornece, por si só, algumas estatísticas aquando da emissão de vídeo; no entanto, com o programa Wireshark [106] conseguem-se obter informações ainda mais detalhadas.

Assim, para obter a informação pretendida, o programa VLC teria de enviar o vídeo através do protocolo RTP (*Real-time Transport Protocol* – camada de aplicação), ao contrário do protocolo o UDP (camada de transporte). Porém, como o RTP corre sobre UDP, o Wireshark reconhece os pacotes capturados como UDP, sendo necessário fazer uma descodificação, transformando-os em pacotes RTP. Após os dados descodificados, este analisador de redes consegue disponibilizar os seguintes parâmetros (Figura 18):

- Número da sequência de cada pacote;
- *Jitter* (ms);
- Largura de Banda (kbps);
- Número total de pacotes;
- Número total de pacotes perdidos.

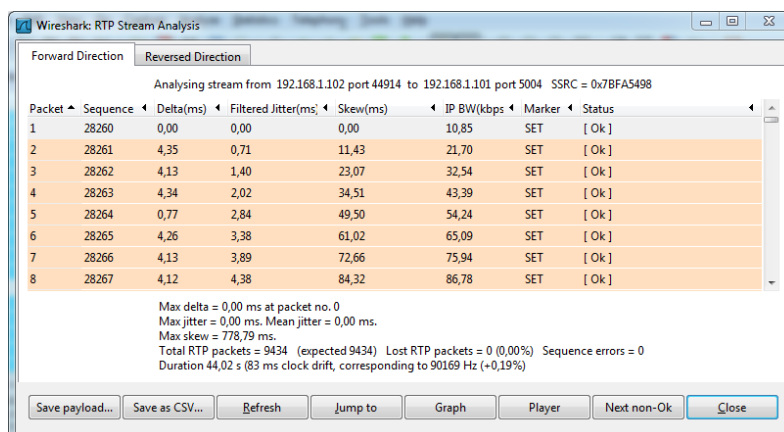


Figura 18 – Exemplo de análise de emissão de vídeo do Wireshark

Com o número de sequência dos pacotes é possível verificar, para além do número de pacotes perdidos, a existência de números de sequência errados. O Wireshark apresenta também o valor do *jitter* em cada pacote, sendo possível posteriormente fazer uma média destes valores para cada cenário correspondente ou ver a evolução dos valores ao longo do tempo/distância. Criou-se também um *script awk* que faz a média de todos os pacotes transferidos por segundo de

forma a ter um valor de *jitter* por segundo, para que o número de dados não se estendesse demasiado.

Com a ajuda do Wireshark é possível aceder também aos pacotes capturados e gravá-los em ficheiros CSV (*Comma-Separated Values*) que grava num ficheiro de texto todos os valores adquiridos, incluindo a hora do PC em cada pacote (que já se encontra sincronizado pela do GPS e, consequentemente, pela do outro PC). Posteriormente, tendo acesso à hora de cada pacote, associado a um determinado SN (*Sequence Number*), é possível criar um programa em linguagem C que faça a comparação dos dois tempos através do SN, os subtraia e obtenha o atraso pretendido. Para facilitar a análise do programa anterior, teria que ser criado outro que passasse o tempo indicado para *epoch time* (tempo em segundos desde o dia 1 de Janeiro de 1970). No entanto, esta análise resulta na obtenção do atraso deste o tempo do envio dos dados até a sua recepção, não contabilizando o tempo de processamento da codificação/decodificação, principal responsável pelo atraso verificado.

Depois de algum tempo despendido com o intuito de melhorar a transmissão no VLC e de arranjar a melhor forma de analisar os resultados, verificou-se que o próprio programa introduzia sempre um atraso de, no mínimo, 500ms na transmissão (sendo que este atraso é próprio e característico do VLC). Como meio segundo de atraso numa transmissão poderá fazer a diferença entre poder aplicar-se ou não este tipo de aplicações a cenários de segurança e auxílio na condução, surgiu o estudo da próxima plataforma que irá ser descrita abaixo.

3.3.3.2 GStreamer

O GStreamer [111] é definido como uma plataforma multimédia que serve como base de desenvolvimento de aplicações de emissão de vídeo e/ou áudio. É um *software* aberto a qualquer utilizador, estando disponível para os principais sistemas operativos. O GStreamer utiliza uma arquitectura baseada em *plugins*, o que contribui para a existência de uma grande compatibilidade com os mais variados e conhecidos *codecs*, e pode ser integrado com várias linguagens de programação, tais como Python, C++, Ruby, entre outras. Assim, foi desenvolvida uma aplicação cliente-servidor, com o objectivo de fazer a emissão de vídeo, capturada pela câmara *web*, em tempo real.

A linha de comandos *server* tem como fim a criação de um servidor UDP que envia, para um IP configurável, a imagem/som da câmara *web* do próprio PC com uma codificação em tempo real através de *smoke*, com o *codec* *ffmpegcolorspace*. Este foi configurado para uma resolução com largura de 320 e altura de 240, com um *framerate* de 30 quadros por segundo (sendo este valor o que melhor se comportava no envio de vídeo) e com uma qualidade de 50%. Estes parâmetros usados foram os que resultaram num melhor comportamento e numa relação qualidade/atraso.

A linha de comandos *client* tem como função abrir a porta predefinida e receber o vídeo através da mesma. Este programa faz a decodificação através de *smoke* e utiliza o mesmo *codec*, *ffmpegcolorspace*.

Por fim, falta referir que os testes foram realizados em PCs que tinham um processador Intel Atom N450, com uma velocidade de relógio de 1.66GHz. Se a codificação/decodificação for feita por processadores de menor velocidade, é possível que os atrasos sejam maiores.

3.3.4 Sincronização de Relógios

Um desafio bastante interessante foi a sincronização do GPS com a hora local dos computadores envolvidos. Na maioria dos testes não foi necessária a intervenção do computador nos resultados, isto é, eles eram usados apenas para aceder às placas como controlo e para colocar os diversos programas a correr. No entanto, as placas tinham de se encontrar perfeitamente sincronizadas. Como nestes testes os valores retirados são na ordem dos milissegundos, é importante que os resultados não sejam adulterados pela simples questão de dessincronização dos relógios. Sendo assim, a solução usada foi sincronizar os relógios dos equipamentos usados por um dos módulos GPS das placas, garantindo assim uma boa sincronização. Para que tal fosse possível, foi necessário que a placa em questão estivesse a correr o *gpsd* [112], que permite que a hora de GPS seja partilhada por determinada interface e acessível por outro equipamento. No caso dos computadores foi necessário também instalar o suporte ao *gpsd* e posteriormente ser usado o *gpspipe* [112] para a aquisição da hora. Para que tudo fosse feito de forma automática, e porque a automatização dos processos é sempre a melhor solução, desenvolveu-se um *script* que actualiza a hora do computador correctamente apenas com a introdução de uma linha de comando.

Para finalizar, falta referir que o *script* evoluiu para uma solução baseada em NTP (*Network Time Protocol*), em que é criado um servidor NTP em cada placa, que vai buscar as informações de hora ao GPS.

3.4 Desafios

Nesta secção são apresentados alguns dos desafios que surgiram ao longo da Dissertação, bem como as suas respectivas soluções.

3.4.1 Antenas Exteriores / Interiores

Numa primeira fase, em que foram realizados testes preliminares na estrada de forma a ver qual o comportamento das placas em determinadas situações, apercebemo-nos que teríamos de decidir se a comunicação entre veículos ia ser feita com as antenas dentro ou fora dos veículos. Assim, a nossa decisão teve de recair para o que poderia atenuar menos o sinal: o facto de as antenas estarem dentro dos veículos e o próprio veículo estar a atenuá-lo; ou introduzir um adaptador (também ele atenuador), que leva a antena até ao exterior, com suporte magnético na ponta, e colocar esta no centro do tejadilho do veículo. Realizámos, então, alguns testes com as antenas fora e dentro do veículo e chegámos à conclusão que a realização dos testes com as antenas colocadas no tejadilho têm melhor PDR, RSSI e, conseqüentemente, maior alcance, ou seja, a atenuação feita pela estrutura do veículo é maior que a atenuação feita pelo cabo que leva a antena até ao exterior, somada à atenuação dos dois conectores adicionados à ligação.

3.4.2 Direccionalidade das Antenas

Este subtópico é, de facto, um dos mais importantes e que não poderia deixar de ser descrito. Como foi referido acima, as antenas usadas para a frequência de 5.9GHz foram as da L-Com. Nos primeiros testes verificou-se que os veículos, depois de passarem um pelo outro, quase que perdiam a ligação entre eles (havia casos em que a perda de comunicação era total). Depois de analisados estes resultados, concluiu-se que, pelo facto de os testes terem sido feitos com as antenas no interior dos veículos, o vidro traseiro (local onde era colocada a placa) de determinado veículo influenciava as comunicações. No entanto, nos testes seguintes com as antenas fora dos veículos, voltámos a ter resultados semelhantes. Deste modo, foi necessário fazer testes mais exaustivos às antenas vendidas como “omnidireccionais” (no *datasheet* do fabricante o diagrama de radiação é bastante próximo de 360 graus). Depois de analisados os vários registos dos testes realizados pôde concluir-se que, de facto, existe uma posição entre as antenas que impede que estas comuniquem e que coincidia com a posição dos testes anteriores. Não houve a possibilidade de medir as antenas na Câmara Anecóica, porque não existia um VNA (Vector Network Analyzer – medidor de amplitude e fase) acima da frequência dos 2GHz. É de salientar, portanto, que os resultados aqui presentes sofreram alguma influência devido às antenas não serem totalmente omnidireccionais.

3.5 Sumário

No capítulo corrente foi apresentada toda a configuração da *testbed*, começando por ser descrito o equipamento utilizado. De seguida, foi apresentada a implementação da norma específica para redes veiculares, IEEE 802.11p, realizada pelo nosso grupo de trabalho, assim como todo o *software* desenvolvido com vista a atingir os objectivos presentes nesta Dissertação. De seguida, foi apresentada uma primeira análise da transmissão de vídeo através da plataforma GStreamer, bastante mais adequada ao tipo de comunicação usado em redes veiculares, obtendo-se resultados bastante superiores aos apresentados pelo VLC.

Por fim, foi importante mostrar neste capítulo alguns dos desafios mais importantes encontrados ao longo de todo este trabalho, onde se destaca a escolha da colocação das antenas, assim como alertar para o facto de estas não serem completamente omnidireccionais.

4. Experiências em Cenários Reais

Neste capítulo serão apresentados os cenários testados no âmbito desta Dissertação; ao longo da descrição das várias experiências irá ser explicada a razão de terem sido realizadas, acompanhadas sempre que possível, por um esquema e uma fotografia do local, de modo a facilitar a compreensão do teste em questão. No mesmo capítulo são apresentados os resultados experimentais, acompanhados, sempre que possível, de resultados simulados/teóricos ([3] e [46]), sendo complementados no final com uma discussão acerca dos mesmos. São ainda apresentados alguns gráficos representativos das experiências descritas, assim como os resultados de pequenos testes iniciais, relativamente aos tempos de associação, taxas de transmissão e atrasos devido aos múltiplos saltos. Em termos de cenários reais, é apresentado o alcance máximo atingido, o desempenho a velocidades relativas, o comportamento das comunicações nos túneis, viadutos e na transmissão de vídeo, assim como é avaliada a melhoria das comunicações com o suporte de infra-estruturas.

Nos cenários testados pretende-se verificar qual a variação da indicação da força de sinal recebido (RSSI), qual o rácio de pacotes entregues (PDR), bem como verificar, no caso da transmissão de vídeo, o atraso de transmissão. Assim, usando cenários reais para testar as mais variadíssimas situações que poderão ocorrer no “mundo real”, podem-se tirar conclusões sobre o desempenho da rede veicular, sobre a capacidade das redes veiculares e o que se poderá conceber com estas. A escolha da verificação de ambos os valores (RSSI e PDR) é importante, porque a variação do PDR, embora acompanhe os valores de RSSI, não é completamente linear, pelo facto de podermos ter o RSSI a diminuir e a percentagem de entrega de pacotes continuar a 100%.

Tabela 7 – Parâmetros usados

Parâmetros	Valor
Canal	175
Frequência Central (f)	5.875 GHz
Largura de Banda	10 MHz
TxPower Definido	23 dBm / 18 dBm / 4 dBm
TxPower Medido	14.58 dBm / 12.51 dBm / -4,49 dBm
Sensibilidade do Receptor	-95 \pm 2dBm
Ganho das Antenas	2 dBi

A Tabela 7 mostra os parâmetros usados em todos os cenários testados nesta Dissertação. O canal utilizado foi o 175, que corresponde à frequência de 5.875GHz. A largura de banda é de 10MHz (menor taxa de transmissão, mas maior robustez e alcance). Visto que os valores dos TxPowers já foram mencionados no documento, destaca-se a sensibilidade do receptor (responsável pela selecção da recepção do sinal com determinada força) que foi definido no valor mais baixo para que fosse captado o máximo de sinal possível, ou seja, o equipamento

abaixo de -94dBm já não consegue receber qualquer sinal (razão pelo qual os gráficos encontram-se limitados entre -35 e -95 dBm).

No entanto, antes de passar para as próximas secções, convém notar que todos os testes foram realizados com sol e céu limpo. Os resultados de PDR e RSSI apresentados neste capítulo são a cada instante, a média entre o valor lido do instante considerado e os 5 anteriores, para que houvesse uma suavização da linha apresentada, diminuindo também alguns possíveis desvios. Procedeu-se a este tipo de análise em todos os resultados experimentais obtidos, excepto nos extremos das comunicações, de forma a não adulterar os alcances das comunicações. Os resultados de RSSI variam entre os valores de -35 dBm (100%) e -95 dBm (0%) devido à sensibilidade já mencionada e referida na Tabela 7. Os valores de PDR variam, como é natural, entre os 0 e os 100%. Todos os intervalos de confiança exibidos são de 95%, onde foi usada a distribuição de t-Student, pelo facto de existirem poucas amostras em cada cenário, uma vez que não é possível efectuar muitas repetições (5 a 10, dependendo dos cenários).

As simulações realizadas foram efectuadas usando um simulador de código aberto, o NS-3 (*Network Simulator 3*) [113], configurado com os parâmetros presentes Tabela 7 (valores estes também usados a nível experimental).

Nas subsecções seguintes são apresentados os vários cenários realizados ao longo da Dissertação (em LOS e NLOS), desde a análise do alcance máximo de comunicação ao desempenho em velocidades relativas, cruzamentos sem linha de vista, túneis, viadutos, transmissão de vídeo e cenários com e sem RSUs (analisando também a diferença do caso delas se encontrarem desligadas ou ligadas).

4.1 Testes Iniciais

Antes de passar a qualquer tipo de cenário real, é necessário e importante fazer alguns testes iniciais de forma a averiguar as capacidades das placas IEEE 802.11p utilizadas para comunicação. Os resultados presentes nesta subsecção foram todos obtidos em laboratório, com as placas distanciadas de menos de 1 metro e sem qualquer outra fonte, para além do equipamento a testar, a trabalhar à frequência de 5.875GHz. Desta forma, esta secção mostrará, de uma forma simples, quais os limites impostos pelo material utilizado relativamente aos Tempos de Associação, Taxas de Transmissão e Atraso *Multihop*.

4.1.1 Tempos de Associação

Tempo de associação é o tempo mínimo necessário para que uma placa, após ter sido ligada, conseguir identificar-se na rede. De modo a verificar-se os tempos de associação das placas, procedeu-se do seguinte modo: usaram-se duas placas (a placa 40 - MAC: WinstroN_22:6d:8e; e a placa 44 - MAC: WinstroN_22:6d:7b) ligadas no modo *ad hoc*, em que a 40 tem ligada a interface mon0 em modo monitor, coligada à wlan0 (interface de comunicação a 5.9GHz), de forma a conseguir captar todos os pacotes gerados a esta frequência. Garantiu-se também que mais nenhuma placa se encontrava a operar no mesmo canal, para que não

houvesse informação desnecessária durante a transmissão observada. De seguida, começou-se a captar informação através da interface *mon0*, enquanto a outra placa se encontra ligada à rede. Posteriormente, foi gerado um *script* que:

1. Remove o módulo *ath5k*;
2. Espera 10 segundos;
3. Volta a activar o módulo *ath5k*;
4. Configura a ligação à rede.

```
root@abc:~# tshark -i mon0
Running as user "root" and group "root". This could be dangerous.
Capturing on mon0
0.000000 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=419, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
0.204798 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=421, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
0.409613 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=423, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
0.614434 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=425, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
0.716833 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=426, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
0.921656 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=428, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
1.024080 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=429, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
1.228874 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=431, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
1.433695 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=433, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
1.638529 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=435, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
1.945774 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=438, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
2.150560 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=440, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
2.252981 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=441, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein" Último Beacon (Módulo ath5k desactivado)
15.232016 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Probe Request, SN=1, FN=0, Flags=.....C, SSID="drivein" Probe Request
15.232530 -> WistronN_22:6d:8e (RA) IEEE 802.11 Acknowledgement, Flags=.....C
15.232554 WistronN_22:6d:8e -> WistronN_22:6d:7b IEEE 802.11 Probe Response, SN=13, FN=0, Flags=....., BI=100, SSID="drivein" Probe Response
15.404086 :: -> ff:02::1:ff:2:6d:7b ICMPv6 Neighbor solicitation
15.463783 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=3, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
15.668606 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=5, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
15.771004 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=6, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
16.403852 80::20b:8bff:22:6d:7b -> ff:02::2 ICMPv6 Router solicitation
17.204741 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=21, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
```

Figura 19 – Tempo de Associação

```
root@abc:~# tshark -i mon0
Running as user "root" and group "root". This could be dangerous.
Capturing on mon0
0.000000 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=442, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
0.102464 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=443, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
13.043719 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Probe Request, SN=2, FN=0, Flags=.....C, SSID="drivein" Probe Request
13.044203 -> WistronN_22:6d:8e (RA) IEEE 802.11 Acknowledgement, Flags=.....C
13.044233 WistronN_22:6d:8e -> WistronN_22:6d:7b IEEE 802.11 Probe Response, SN=14, FN=0, Flags=....., BI=100, SSID="drivein" Probe Response
13.076853 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast ARP Who has 10.0.0.40? Tell 10.0.0.44
13.871659 80::20b:8bff:22:6d:7b -> ff:02::2 ICMPv6 Router solicitation
13.919526 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast ARP Who has 10.0.0.40? Tell 10.0.0.44
13.919822 -> WistronN_22:6d:8e (RA) IEEE 802.11 Acknowledgement, Flags=.....C
13.919844 WistronN_22:6d:8e -> WistronN_22:6d:7b ARP 10.0.0.40 is at 00:0b:6b:22:6d:8e
13.920494 10.0.0.44 -> 10.0.0.40 ICMP Echo (ping) request
13.920898 -> WistronN_22:6d:8e (RA) IEEE 802.11 Acknowledgement, Flags=.....C
13.920924 10.0.0.40 -> 10.0.0.44 ICMP Echo (ping) reply Ping Reply
14.030072 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=15, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
14.439715 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=19, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
14.542114 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=20, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
14.951758 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=24, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
15.259009 WistronN_22:6d:7b -> Broadcast IEEE 802.11 Beacon frame, SN=27, FN=0, Flags=.....C, BI=100, SSID="drivein"
```

Figura 20 – Tempo de Associação com ping

Analisando a Figura 19 (registo do *tshark*), pode-se verificar que os primeiros 14 segundos podem ser ignorados, pois trata-se do tempo que demora a fazer a remoção do módulo *ath5k* e activar de novo, incluindo ainda o tempo de espera de 10 segundos imposto pelo *script*. Pode então observar-se que ao segundo 15.232016 é quando se captura o primeiro *Probe Request* da placa 44 que foi activada, e aos 15.463783 segundos (passados 0.231767s) a mesma placa já

recebeu um *Probe Response* e começa a enviar Beacons normalmente, pois já se ligou à rede desejada.

Um segundo teste foi também realizado, com a diferença que desta vez a placa 44 tenta fazer um *ping* à placa 40 logo que possível. Através da Figura 20 é possível notar o seguinte: o primeiro *ping reply* é dado aos 13.920924s e o primeiro *Probe Response* aos 13.044233, dando uma diferença de 0,876691s. No entanto, este tempo apresentado inclui os tempos dos ARPs (*Address Resolution Protocol*) (do segundo 13.076853 até ao 13.919844), dando um total de 0.842991s. Deste modo, subtraindo este valor ao anterior dá um total de 0.0337s.

Assim, é possível concluir que os tempos de associação são de poucas dezenas de milissegundos, o que permitiu verificar que não terá influência nas experiências realizadas.

4.1.2 Taxas de Transmissão e Atraso *Multihop*

Um aspecto importante a ser testado é relativamente às taxas de transmissão, pois não será possível realizar testes mais detalhados e complexos quando não existe informação acerca da taxa de transmissão conseguida pelo equipamento. Desta forma, fizeram-se alguns testes em laboratório de forma a obter as informações necessárias. Para tal recorreu-se à aplicação *Iperf* (programa de medição de largura de banda) [114]. De forma a testar-se as várias conexões, realizou-se a montagem da Figura 21, onde os PCs se encontravam ligados às placas através de um cabo Ethernet e as placas ligadas entre si através das antenas de 5.9GHz, sob a norma IEEE 802.11p.



Figura 21 – Esquemático para medição da Taxa de Transmissão

A Tabela 8 mostra os valores resultantes das experiências realizadas.

Tabela 8 – Taxas de Transmissão

Iperf (Cliente – Servidor)	Método	Largura de Banda
Sem Relay	Rotas Estáticas	9.60 Mbit/s
	AODV	600 Kbit/s
	OLSR	9.58 Mbit/s
Com Relay (s)	Rotas Estáticas	5.02 Mbit/s

Antes de fazer as medições pretendidas, fez-se um teste com o objectivo de verificar que, de facto, entre os dois equipamentos ligados por cabo (computador e placa) não havia grandes perdas e constatou-se que a largura de banda obtida foi de 96 Mbit/s, muito próxima dos 100 Mbit/s esperados.

De seguida, o segundo teste realizado apenas incluiu dois computadores e duas placas ligadas a eles por cabo Ethernet (ou seja, sem *relay* – placa do meio da Figura 21), para que o valor perdido neste troço influenciasse o mínimo na largura de banda calculada entre um computador e o outro. Tendo o servidor a correr no primeiro computador e o cliente no computador oposto, obteve-se o resultado presente na Tabela 8: 9.60 Mbit/s, valor bastante próximo do valor máximo que seria 11 Mbit/s. Este teste foi feito sem qualquer protocolo de encaminhamento e, desta forma foi necessário, em primeiro lugar, criar uma *bridge* (dispositivo que interliga duas ou mais redes) entre as duas interfaces das placas (Ethernet e interface sem fios 5.9GHz). A seguir, preencheram-se as tabelas de encaminhamento de cada equipamento recorrendo a rotas estáticas e obteve-se o valor mencionado.

De seguida, o teste realizado teve como objectivo verificar de que forma uma ou duas placas no meio da comunicação influenciavam a taxa de transmissão. Com a ajuda novamente das rotas estáticas, obrigou-se a que o sinal passasse por uma ou duas placas entre as placas ligadas directamente aos computadores, isto é, um ou dois *relays*. Neste teste verificou-se que a largura de banda baixou para cerca de metade da taxa total, para 5.02 Mbit/s, independentemente do número de placas utilizadas. A explicação deve-se ao facto de as placas, no meio da comunicação, terem de usar a mesma interface para o reencaminhamento dos dados, diminuindo para metade a largura de banda: metade para receber, metade para enviar.

Por último, mas não menos importante, verificou-se qual a largura de banda disponível para dados quando os principais protocolos de encaminhamento usados em simulações de redes veiculares (NS-3) são aplicados (ver 2.3.2) sem *relays*. No primeiro ensaio foi activado o AODV nos quatro equipamentos, verificando-se que não era possível activar o protocolo em múltiplas interfaces (já observado em 2.3.2), o que levou a uma outra solução já realizada anteriormente: a criação de uma *bridge*. Com esta resolução já se tornou possível a aplicação do protocolo a esta interface, apesar de a largura de banda ter descido de um valor teórico de 10 Mbit/s para 600 Kbit/s. Este valor é bastante inferior relativamente ao esperado e pode ser explicado pela criação da *bridge*, que não permite ter larguras de banda tão elevadas. Por fim, aplicou-se o protocolo OLSR, implementado através do OLSRd [56], que se comporta optimamente em interfaces múltiplas, conseguindo obter óptimos resultados (9.58 Mbit/s). Porém, há que lembrar que este teste foi realizado apenas com duas placas o que, em cenários reais, com grandes quantidades de veículos, as mensagens de controlo do protocolo OLSR podem utilizar mais largura de banda do que a observada. Contudo, também se realizou mais um teste com mais uma placa em rede a disseminar mensagens de controlo, com o objectivo de verificar se haveria influência na largura de banda (embora os dados não passassem por esta, pois havia caminho directo). A conclusão deste teste foi que não houve qualquer alteração relativamente aos valores anteriormente medidos, até porque sendo este um protocolo proactivo, como a rede não foi modificada é natural que não sejam trocadas muitas mensagens de controlo a não ser as mensagens *Hello*.

De notar que em todos os testes foram enviados ficheiros de 100MB (configurável no *lperf*) para que a média apresentada na consola, dada pelo programa, seja resultante de um número elevado de pacotes, aumentando assim a confiança dos valores obtidos.

Antes de serem apresentados os resultados dos cenários reais, é importante verificar qual o atraso existente em comunicações com múltiplos saltos de forma a verificar se este atraso

poderá ser desprezável ou não. Por conseguinte, realizou-se um teste com várias placas onde se obrigou a passagem de informação, forçando 1, 2 ou 3 saltos (Figura 22). Para tal, utilizou-se a ferramenta *traceroute* (que funciona como um *ping*, mas com acesso aos IPs dos vários saltos).



Figura 22 – Cenário para comunicações com múltiplos saltos (Esquemático)

Tabela 9 – Atrasos em comunicações com múltiplos saltos

Número de Saltos	1	2	3
Atraso (ms)	0.49	5.51	15.58

Analisando os dados da Tabela 9, pode verificar-se que os atrasos entre os múltiplos saltos podem ser desprezados, comparativamente aos tempos de *re-healing* habituais, que são, normalmente, na casa dos segundos.

4.2 Alcance Máximo com linha de vista

Neste primeiro cenário, um dos veículos encontra-se numa posição fixa, enquanto o outro se move a uma velocidade constante de 50 km/h (ver Figura 23). Este foi o único teste em que foram usados dois valores de TxPower (18dBm e 23dBm) de forma a verificar qual a variação causada pelas diferentes potências. Este teste foi realizado numa estrada com cerca de 2km com linha de vista, tendo o cuidado de se realizar os testes fora das horas de ponta (Figura 23).

O principal objectivo deste teste em linha de vista (LOS – *Line-Of-Sight*) é averiguar as potencialidades das placas de comunicação IEEE 802.11p, ou seja, verificar qual a distância máxima de comunicação possível e, consequentemente, averiguar qual a percentagem de pacotes entregues e quais os valores de RSSI ao longo da distância.

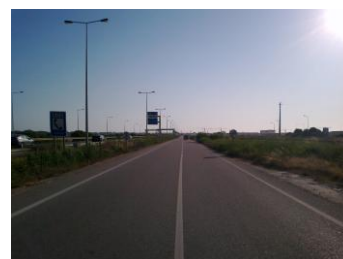


Figura 23 – Cenário LOS: 1 veículo em movimento - Esquemático (à esquerda); Fotografia real do local (à direita)

A Figura 24 compara os valores de RSSI e PDR medidos, simulados e teóricos em função da distância. Os resultados mostram que, nas comunicações em linha de vista, o sinal recebido é suficiente para comunicações entre veículos até 1km de distância. Até aos 600m de distância entre os dois veículos, a diferença dos valores de RSSI e PDR para 18 e 23 dBm não é significativa; para distâncias maiores que 600m, existe de facto um decréscimo acentuado do RSSI e do PDR nos valores correspondentes aos 18dBm.

Comparando estes resultados com a combinação pura dos modelos de propagação (representado na Figura 24 como 'Teórico') é possível verificar, de forma clara, que existe uma grande discrepância entre os valores. De forma a modelar os efeitos de *fading*, os autores de [3] realizaram várias simulações usando como base uma combinação entre os dois modelos Friis Free-Space (Zona 1) e Two-Ray *ground* (Zona 2) e desenvolveram um modelo estatístico, que se baseia nos resultados empíricos obtidos da *testbed*. As duas zonas identificadas pelos autores encontram-se representadas na Figura 25.

O primeiro modelo referido não entra em conta com as reflexões do solo; no entanto, o segundo modelo apresentado já entra com as reflexões no solo, tornando-se mais completo. O modelo de canal estatístico simula a influência real dos efeitos de *fading*, entre outros efeitos presentes. A derivação deste modelo foi realizada observando as variações instantâneas dos valores de RSSI, caracterizando-as através de um ajuste estatístico, sendo que esta caracterização é produzida pelo NS-3. Porém, embora este seja um modelo estatístico, já foi validado por diferentes fontes independentes e equipamentos diferentes. Assim, o simulador corre os mesmos cenários, como apresentado na *testbed* real. Os resultados da simulação, com a combinação dos dois modelos de propagação e o modelo estatístico, são representados pelas curvas 'Simulação'. Neste caso, é observado que os valores de simulação são bem mais próximos dos valores medidos relativamente às linhas representadas pelo modelo teórico.

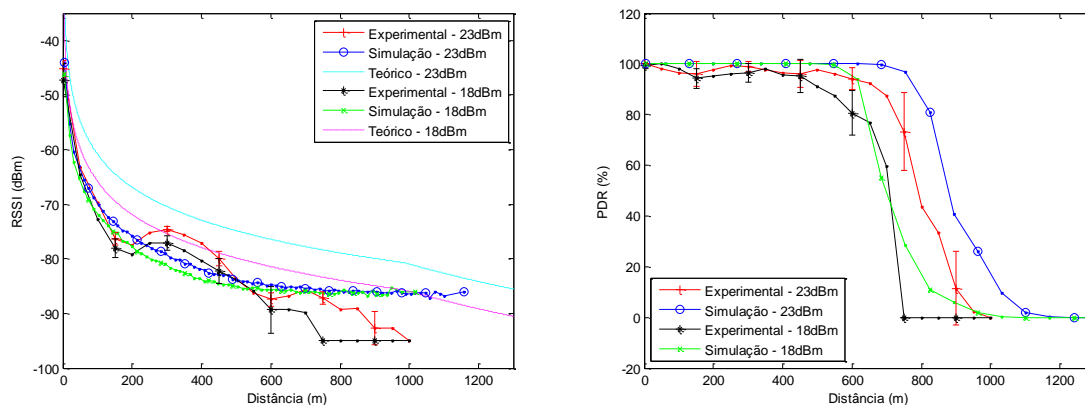


Figura 24 – RSSI e PDR em LOS com 1 veículo em movimento

No caso dos valores de PDR em função da distância entre os veículos, com diferentes potências de transmissão, o alcance de comunicação difere em, aproximadamente, 150m, considerando o ponto em que o PDR baixa dos 80%. A distância máxima de comunicação é então de, aproximadamente, 700m e 950m, para 18dBm e 23dBm, respectivamente. Comparando os resultados experimentais com os simulados, observa-se que a propagação da integração e os modelos do canal estatístico são capazes de modelar a comunicação entre veículos com precisão

elevada. De notar que os valores de PDR dão uma informação muito mais precisa sobre o alcance de comunicação, pelo facto de os valores de RSSI serem calculados através de uma média a cada segundo. Assim, se em determinado instante apenas for recebido um pacote, o valor de RSSI é igual ao desse pacote.

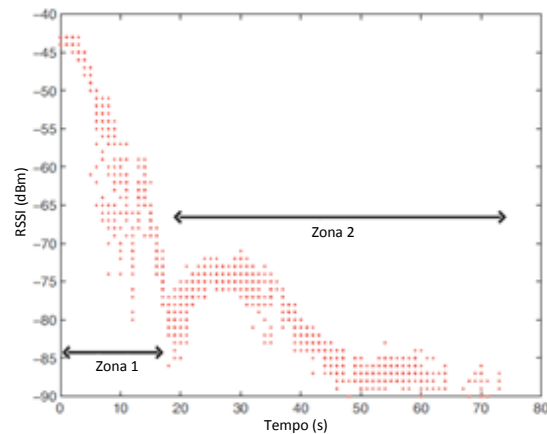


Figura 25 – Simulação dos valores de RSSI no teste de alcance máximo (fonte: [3])

Por fim, é possível verificar que os valores de RSSI e PDR não são dependentes pois analisando as figuras anteriores, os valores de PDR caem de forma abrupta apenas a partir dos 600 metros, enquanto que os valores de RSSI vão descendo ao longo de toda a comunicação de uma forma bastante mais suave (daí a importância de serem medidos estes dois parâmetros e não apenas um deles).

4.3 Desempenho a velocidades relativas com linha de vista

Este cenário consiste na movimentação de dois veículos em sentidos opostos, tendo ambos a mesma velocidade. Para tal, foram realizadas duas experiências com diferentes velocidades: uma a 30 km/h e outra a 50 km/h. O objectivo é concluir se haverá impacto nos valores de RSSI e PDR, quando os veículos trocarem informação entre si a diferentes velocidades relativas (60 e 100 km/h), e verificar se a própria distância de comunicação é alterada relativamente ao cenário anterior (Figura 26).



Figura 26 – Cenários LOS: 2 veículos em movimento (Esquemático)

Neste cenário, antes da realização dos testes em estrada, teve-se o cuidado de verificar até que ponto o Efeito de *Doppler* poderia influenciar as comunicações. Na equação (8) Δf corresponde ao desvio de frequência (Hz), f_0 a frequência da portadora (Hz), v_r a velocidade relativa (m/s) e c a velocidade da luz (m/s). Fazendo os cálculos para uma velocidade relativa de 60 km/h (16.67 m/s), velocidade máxima testada, para uma frequência de 5.9 GHz, o desvio de frequência é de 328 Hz. Este desvio, comparativamente à largura de banda utilizada (10MHz), corresponde a um pequeno desvio de, aproximadamente, 0.003%, pelo que pode ser desprezado. Realizando os mesmos cálculos para uma velocidade relativa de 240 km/h, que corresponde à soma da velocidade máxima mais comum na Europa (120 km/h), o desvio de frequência é de 1311 Hz (0.013% da largura de banda). Assim, é possível concluir que, com as velocidades geralmente praticadas nas redes veiculares, o efeito de Doppler não terá impacto significativo nas comunicações.

$$\Delta f = f_0 \times \left(1 \pm \frac{v_r}{c}\right) [Hz] \quad (8)$$

Os resultados presentes na Figura 27 mostram que, até 100 km/h de velocidade relativa, não existem diferenças significativas entre os valores de RSSI e PDR entre as diferentes velocidades. Pode observar-se, contudo, que existe um ligeiro deslocamento nos valores de RSSI medidos a partir do momento da intersecção entre os dois veículos, cuja razão pode ser o problema da radiação explicado em 3.4.2 ou mesmo o facto de os veículos não serem totalmente simétricos (o maior desvio verifica-se na maior velocidade relativa – 100 km/h). Quando comparado com o cenário anterior (apenas um veículo em movimento), o alcance de comunicação continua com os mesmos valores, por volta dos 950m. As mesmas observações poderão ser feitas nos resultados do PDR. Conclui-se também que os resultados de simulação seguem os valores experimentais, havendo pequenos desvios no início e no fim das comunicações nos valores de RSSI e PDR, mas o total da distância de comunicação experimental é mantida, cerca de 1900 metros (aproximadamente 950m para cada um dos lados). Para as curvas do PDR, os valores simulados provam novamente que estão de acordo com os resultados empíricos. Neste cenário provou-se também que o modelo usado em simulação (o mesmo que o do subcapítulo anterior) [3] encontra-se pronto, também, para modelar as comunicações com maiores velocidades relativas.

O aumento súbito dos intervalos de confiança presentes após os 500m é explicado pelo facto de se encontrarem no limite da diminuição do PDR e, principalmente, pela direccionalidade das antenas. Como se pode verificar, entre -1000 e -500 metros, os intervalos tendem a aumentar, mas não de forma tão expressiva como é verificado na curva descendente. Neste teste, como os veículos comunicam em dois sentidos, nota-se claramente a influência da omnidireccionalidade das antenas, assim como se nota no gráfico do RSSI (já referido em cima).

O artigo [30] também menciona que a duração da ligação é dos poucos factores relacionados com a velocidade relativa dos veículos. Em [30] concluiu-se também que o rácio de pacotes entregues em nada depende das velocidades relativas, o que vai de encontro com os resultados aqui presentes.

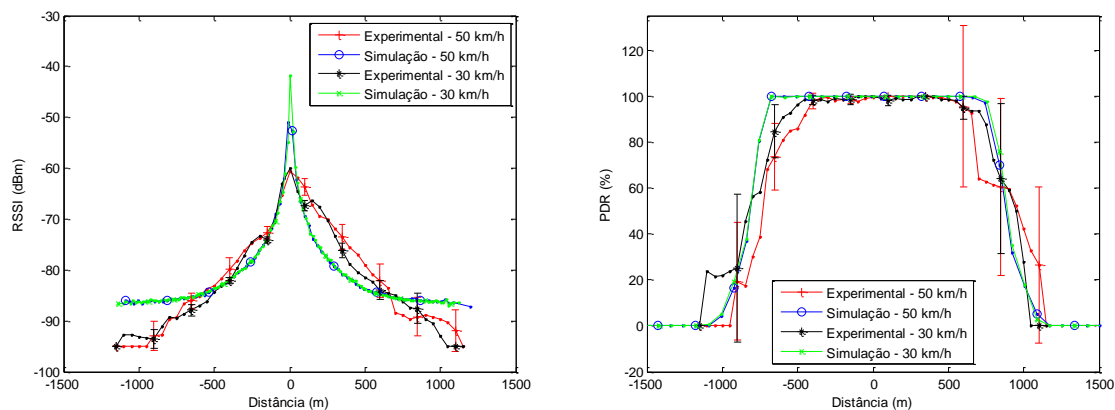


Figura 27 – RSSI e PDR em LOS com 2 veículos em movimento

4.4 Cruzamentos sem linha de vista

A realização de testes em cruzamentos é essencial de forma a verificar o comportamento quando os veículos se encontram em esquinas ou cruzamentos e pretendem passar informação para outro nó da rede, dentro do seu alcance. Este teste irá qualificar o comportamento das comunicações entre veículos perto de intersecções. Os resultados aqui presentes tentam averiguar se o equipamento utilizado tem alcance suficiente para serem trocadas a tempo mensagens de segurança e, também, a possibilidade de ser possível implementar a aplicação relativa aos semáforos inteligentes.

De forma a ter uma visão abrangente da propagação da informação em diferentes tipos de cruzamento, foram realizados três testes em três intersecções diferentes, com a recolha dos valores de RSSI e PDR. Os testes neste tipo de cenário foram os seguintes:

1. 2 Veículos surgem ao mesmo tempo e com a mesma velocidade ao cruzamento, começando exactamente à mesma distância deste (Figura 28 a)). Neste teste pretende-se verificar a que distâncias do cruzamento os veículos conseguem comunicar nos diferentes tipos de cruzamentos;
2. 1 Veículo inicia o seu deslocamento após o outro, fazendo com que ambos não cheguem, ao mesmo tempo, à intersecção (Figura 28 b)). Neste teste pretende-se observar se, no caso de um dos veículos chegar mais cedo ao cruzamento, melhora o alcance de comunicação entre estes e, se sim, se esta melhoria é ou não significativa;
3. Por último, este teste tem por base a situação em que ambos os veículos circulam no mesmo sentido e um deles vira no cruzamento para a esquerda/direita e o outro segue em frente (Figura 28 c)). Com este teste pretende-se analisar outro tipo de situação muito corrente no dia-a-dia e verificar qual a diferença de resultados para os dois testes referidos anteriormente.

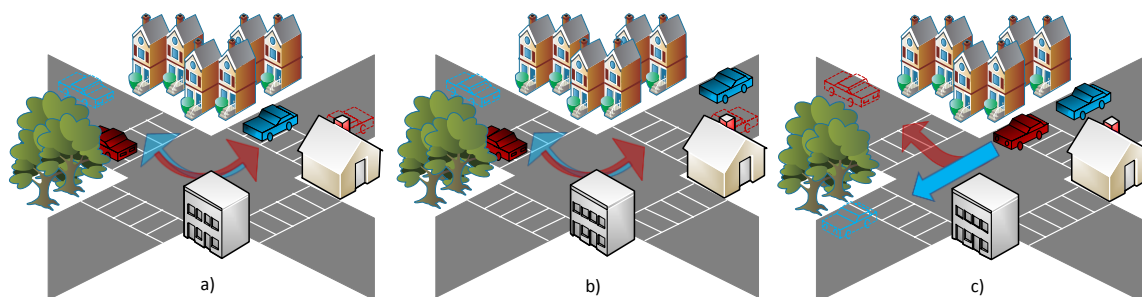


Figura 28 – Cenário de Cruzamento: Medida 1 (à esquerda); Medida 2 (ao centro); Medida 3 (à direita)

Como foi referido no parágrafo anterior, é importante ter resultados nos mais variados modelos de cruzamentos de forma a ter uma amostragem maior e mais completa. Deste modo, realizaram-se os três testes mencionados em 3 cruzamentos diferentes:

1. Intersecção 1 (I1): Edifício de 3 andares a, aproximadamente, 12 metros do centro de ambas as estradas do cruzamento (Figura 29 a)). Em frente ao cruzamento existem pequenas moradias junto à estrada;
2. Intersecção 2 (I2): Parede com 4 metros de altura mesmo junto ao cruzamento, a uma distância de cerca de 4 metros ao centro da estrada, onde, no lado oposto, não existe qualquer tipo de edifício para possíveis reflexões. Poderá dizer-se que é o pior caso (Figura 29 b));
3. Intersecção 3 (I3): Edifício com 4 andares a 24 metros do centro de uma das estradas da intersecção e a 5 metros da outra (Figura 29 c)). Neste cruzamento existem prédios em frente, mas longe da intersecção (cerca de 45m).



Figura 29 – Locais dos três cruzamentos: I1 (à esquerda); I2 (ao centro); I3 (à direita)

É importante explicar a razão de os resultados, nos cenários das intersecções, terem como eixo dos xx a soma da distância às intersecções dos dois veículos. Para auxiliar a explicação, a Figura 30 representa uma possível situação do Cenário 1 explicado anteriormente. Assumindo que os veículos da mesma cor fazem parte do mesmo teste, verifica-se que estes não se encontram à mesma distância do centro do cruzamento no mesmo instante, como era suposto. Analisando da mesma forma este teste como tem sido analisado os cenários anteriores, onde o factor comum era a distância entre os veículos, estar-se-ia a cometer o erro de aglomerar resultados correspondentes aos 100m, quando um deles foi retirado no momento em que outro veículo se encontrava a 50m (veículos azuis), e noutro teste quando o outro veículo se encontrava

a 150m (veículos vermelhos), adulterando por completo os resultados obtidos. A solução encontrada foi ter como base o instante de tempo (sincronizados por hora satélite) e medir previamente o ponto de partida de cada veículo. Naturalmente que depois era necessário obter a mesma aceleração e a mesma velocidade instantânea durante todo o percurso. Como no mesmo instante a distância ao cruzamento poderia continuar a não ser exactamente a mesma, decidiu-se somar a distância entre os dois veículos a cada instante, tornando-a, assim, num factor comum. O mesmo problema se coloca no Cenário 2, porque se torna complexo decidir que valores no eixo do xx indicar, visto que para o mesmo instante haveria duas distâncias sempre diferentes obrigatoriamente, pelo que se utilizou a mesma abordagem.

No caso de ser necessário saber qual a distância de cada um dos veículos ao cruzamento é possível através dos registos do módulo GPS ou mesmo através dos gráficos apresentados. No caso do primeiro cenário, como os veículos chegam ao mesmo tempo, apenas tem de se dividir por dois o valor apresentado no eixo dos xx. Já no cenário 2, como a chegada aos diferentes cruzamentos foi realizada reduzindo para metade a velocidade de um dos veículos, é fácil retirar a distância ao cruzamento de cada um (por exemplo, quando a soma apresentada é de 60m, um dos veículos encontrava-se a 20m do cruzamento e outro a 40m).

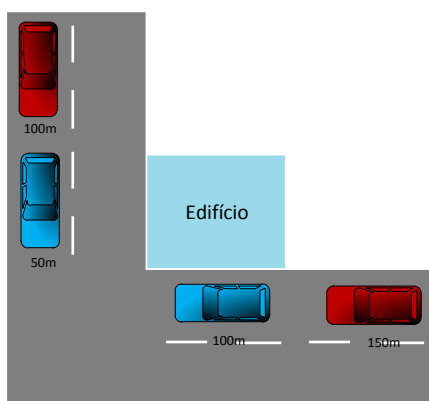


Figura 30 – Soma da distância dos dois veículos em cenários de intersecções

A Figura 31 apresenta os valores de RSSI e PDR obtidos (realizados no primeiro cenário nos três tipos de intersecção) em função da soma da distância ao centro do cruzamento de ambos os veículos. Os resultados mostram que na I1 e I3 foi onde houve um maior alcance nas comunicações, cerca de 100m, enquanto que na I2 as comunicações apenas se dão aos 60m. A explicação para estes resultados tem origem na parede alta mesmo junto ao cruzamento e o facto de não existir qualquer edifício para reflexão dos sinais, interferindo de forma significativa nas distâncias de comunicação.

Estes resultados demonstram também que é possível haver comunicação quando os veículos ainda se encontram afastados do centro da intersecção, havendo tempo suficiente para que aplicações de segurança sejam activadas, informando os condutores para qualquer situação de acidente ou semelhante. Haverá, de igual modo, espaço suficiente para que haja a troca de informação para, por exemplo, haver uma decisão sobre qual o veículo a avançar primeiro, no caso da inexistência de semáforos.

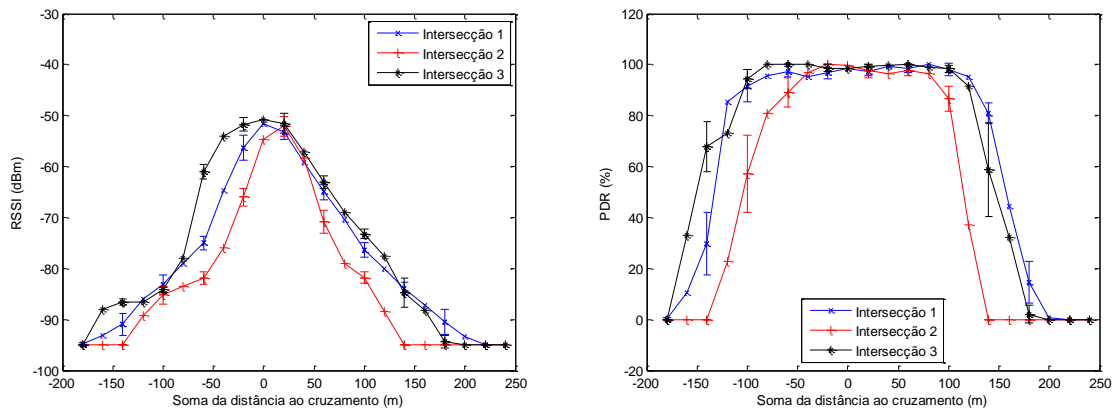


Figura 31 – RSSI e PDR em NLOS - Teste 1

Analisando a Figura 32 (relativa ao cenário 2 – os veículos chegam a instantes diferentes à intersecção), conclui-se facilmente que os resultados são bastante semelhantes aos do teste anterior. Resumindo estas duas situações temos: no primeiro caso, ambos os veículos chegam ao cruzamento no mesmo instante e, no segundo, existe um tempo de chegada diferente. Verifica-se que a distância de comunicação melhora no segundo cenário, mas de forma pouco significativa (cerca de 10m). Assim, para o alcance de comunicação em redes veiculares em cenários de intersecções, é indiferente se um veículo chega primeiro à intersecção, excepto em casos excepcionais que não foram contemplados nestes testes (como, por exemplo, cruzamentos em ‘cotovelo’ sem qualquer edifício na intersecção para reflexões).

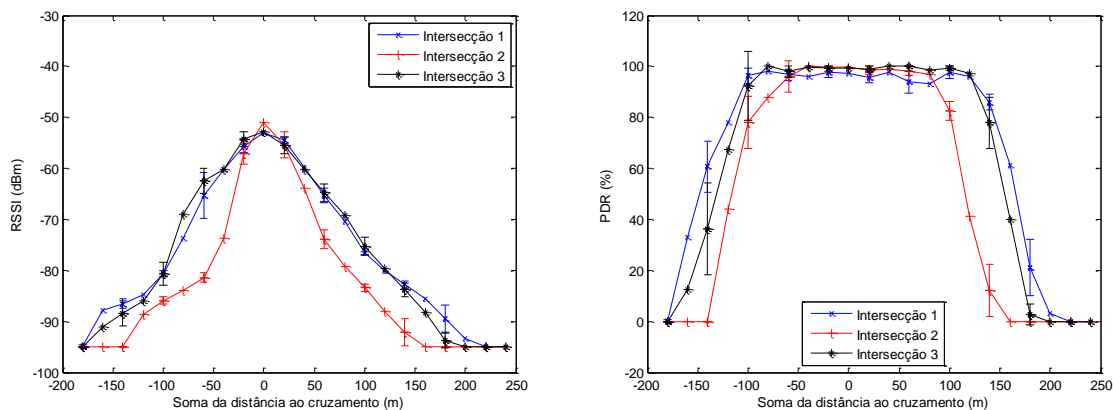


Figura 32 – RSSI e PDR em NLOS - Teste 2

Por fim, no terceiro teste realizado (representado na Figura 33 – correspondente ao cenário 3 em que os veículos circulam juntos e um deles vira numa intersecção), os valores de RSSI e PDR começam a reduzir-se depois de os veículos passarem a intersecção. A justificação para as diferenças entre as várias intersecções pode ser justificada pelas mesmas razões referidas anteriormente, isto é, como se sabe o pior caso corresponde à I2 que é onde se verifica que de facto existe um alcance mais reduzido. Para além desta conclusão, este gráfico mostra claramente as flutuações presentes num dos cenários (I1), mesmo quando os veículos se encontram à mesma

distância, apenas mudando o cenário. Assim, pode afirmar-se que, de facto, os edifícios ajudam a propagação dos sinais, mas, ao mesmo tempo, também causam *multipath*.

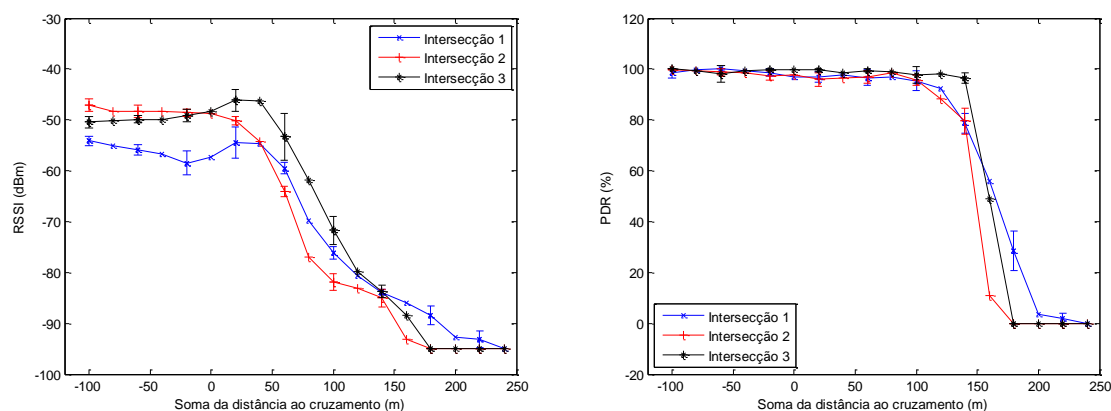


Figura 33 – RSSI e PDR em NLOS - Teste 3

É relevante transmitir que todos os cenários foram testados em simulações por forma a comparar os valores experimentais com resultados simulados. Assim, usou-se uma vez mais o simulador NS-3, usando dois modelos: o Knife-Edge e o Universal Theory of Diffraction. Contudo, os resultados simulados comparados com as medidas feitas no “mundo-real” foram 1 ordem de grandeza abaixo, isto é, a comunicação dava-se por volta dos 15m da intersecção, o que é significativamente baixo e diferente dos resultados obtidos. O grande problema destes modelos é que não considera reflexões nos edifícios presentes no local do cruzamento, apenas consideram os edifícios como obstáculos às comunicações. Para além destes dois modelos, existe um outro modelo denominado de City-Wide [115]. No entanto, este modelo não é apropriado para comparar os resultados verificados, pelo facto de os valores utilizados resultarem de uma agregação de informação de um conjunto de cruzamentos, pelo que não é configurável para as intersecções específicas testadas. Por fim, existem os modelos Ray-Tracing [115], que permitem personalizar e configurar a informação de forma precisa, conseguindo-se adaptar a vários cenários, mas com a desvantagem de serem computacionalmente bastante intensivos, não se adequando a simuladores de rede.

Fazendo uma analogia com os resultados presentes em [92], neste artigo foi concluído que os valores de PDR são maioritariamente acima dos 50% para distâncias ao cruzamento de 50m. Nos resultados desta Dissertação, estes valores conseguem manter-se acima dos 50% por volta 65m, ligeiramente acima do artigo da BMW, corroborando a veracidade dos mesmos.

4.5 Túneis

Visto que cada vez é mais comum existirem túneis, especialmente em grandes cidades (que é onde existe um maior tráfego) ou em zonas montanhosas (que são, normalmente, estradas perigosas), é pertinente testar o comportamento das VANETs e das placas de comunicação quando estas estiverem rodeadas por uma parede com uma espessura considerável de betão e

num local propício a uma quantidade significativa de reflexões. Desta forma, foram realizados testes (Figura 34) em túneis existentes na cidade de Aveiro, tendo o primeiro túnel um comprimento de 210m (Túnel 1) e o segundo de 240m (Túnel 2). A diferença entre os dois túneis, para além do seu comprimento, é o facto de o segundo ter uma estrutura mais aberta e possuir uma curva a meio, fazendo com que os veículos percam, a determinado instante, linha de vista. Neste teste, os veículos mantiveram sempre a mesma distância (cerca de 100m) e uma velocidade constante de 40 km/h, onde foram medidos os valores de RSSI e PDR, com o objectivo de avaliar o desempenho das comunicações neste cenário específico.

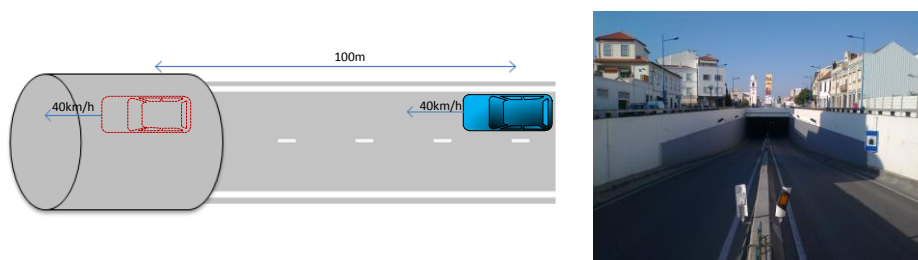


Figura 34 – Cenário Túnel – Esquemático (à esquerda); Fotografia real do local – Túnel 1 (à direita)

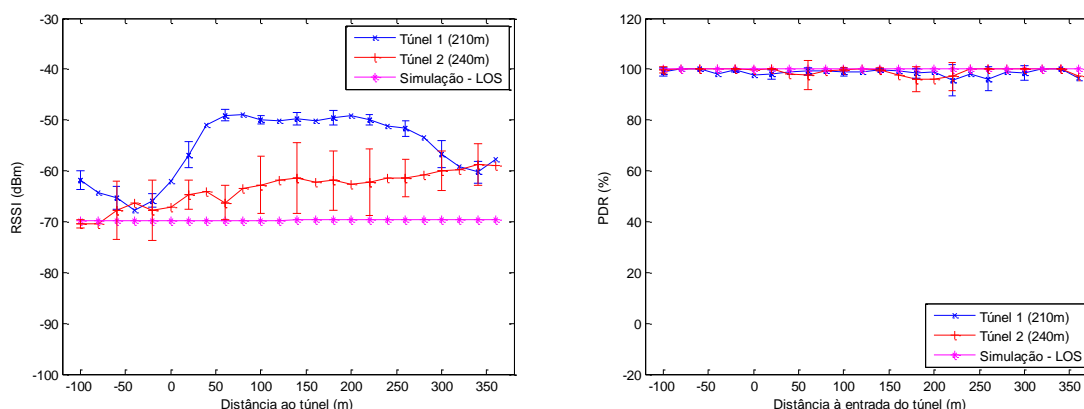


Figura 35 – RSSI e PDR em Túneis

A Figura 35 mostra os valores experimentais de RSSI e de PDR ao longo da distância num teste realizado dentro de dois túneis, acompanhados de valores simulados em linha de vista. A distância presente nos gráficos apresentados é regida pela distância do veículo da frente à entrada do túnel: primeiro, porque facilita a leitura e a análise da figura; segundo, porque é o único factor comum entre as simulações realizadas. A única forma de se conseguir ter a certeza que a distância entre os veículos era a correcta, foi realizar-se uma calibração desta no início de cada teste, tendo o cuidado de manter a velocidade o mais constante possível até ao final.

Analisando a Figura 35 é possível verificar que, depois de os veículos entrarem dentro do Túnel 1, a conectividade melhora significativamente, isto é, as paredes deste funcionam como um guia de onda, amplificando o sinal. Passado cerca de 200m (fim do túnel), os valores de RSSI voltam a tender para os valores iniciais, com uma pequena diferença, porque as condições do outro lado do túnel também são ligeiramente distintas. A linha de RSSI antes da entrada e depois

da saída do túnel piora, pela razão de o primeiro veículo começar a descer para entrar neste e, nesse instante, perde-se a linha de vista entre os dois veículos. O crescimento dos valores de RSSI dos -50m aos 0m deve-se, exclusivamente, ao “regresso” da comunicação em linha de vista, não sendo ainda, neste intervalo de valores, o túnel o responsável pela melhoria das comunicações, como poderá parecer numa primeira análise. O mesmo fenómeno acontece à saída deste, que é explicado pelos mesmos motivos, ou seja, existe uma melhoria das comunicações depois de os veículos retomarem a linha de vista.

Relativamente aos resultados de RSSI do Túnel 2 verifica-se que existe uma melhoria dos valores ao longo do túnel (e sempre superiores aos de LOS simulados), mas não de uma forma tão acentuada como no primeiro. A justificação para esta diferença é explicada pelo facto da entrada do túnel ser bastante mais longa (no primeiro túnel a entrada é bastante mais rápida e acentuada, chegando a haver perda de linha de vista), e pelo facto de este ter uma estrutura menos fechada. Os intervalos de confiança no Túnel 2 são mais elevados a meio do túnel pela existência da curva já referida acima, impedindo a linha de vista entre os veículos. A diferença de valores de RSSI antes e depois do Túnel 2 é justificada pela mesma razão referida acima.

Como já foi referido, os resultados presentes estão acompanhados de resultados simulados. As linhas simuladas mostram os valores de RSSI e PDR em LOS para os mesmos parâmetros de distância entre veículos, velocidade e potência de transmissão. Como se pode verificar, os valores experimentais no momento da entrada dos túneis sofrem um melhoramento (em média, cerca de 10 unidades) quando comparada à linha simulada, o que corrobora as conclusões feitas em cima. As linhas simuladas são apresentadas quase como linhas contínuas, porque as condições do cenário simulado não sofrem qualquer tipo de variação, mantendo-se sempre constantes.

Relativamente aos valores de PDR presentes pouco se pode acrescentar: verifica-se que ao longo de todo o percurso analisado, o PDR experimental mantém-se sempre acima dos 96%, embora os intervalos de confiança à saída dos túneis aumentem cerca de 4 unidades relativamente aos intervalos restantes. Desta forma, pode-se concluir que a perda de pacotes dentro de um túnel não é significativa. O PDR simulado encontra-se sempre a 100%, como era esperado, pelas mesmas razões expostas anteriormente (condições do cenário sempre constantes).

Falta lembrar que os resultados aqui presentes apenas incluem dois veículos em comunicação, ou seja, em cenários mais realistas, com uma maior quantidade de veículos, o número de interferências aumentaria, para além de serem amplificadas pelas paredes dos túneis, podendo causar um impacto negativo nas comunicações, situação que só com dois veículos não é possível de se verificar.

Para finalizar, existe uma questão pertinente acerca da utilização de RSUs nos túneis que será testado futuramente. Em situações de túneis com curvas e/ou mais longos em que se queira passar informação entre os extremos destes ou entre estradas rodoviárias à superfície e estradas subterrâneas, pode haver a necessidade da instalação de uma infra-estrutura específica para este efeito, pois, sem ela, a passagem de informação entre os dois cenários exemplificados seria praticamente impossível apenas via *multihop* V2V, levando a um tempo de atraso bastante elevado e inaceitável.

4.6 Viadutos

Os viadutos são importantes nas cidades, pelo facto de se conseguir manter a continuidade da via de comunicação, sem ter de se interromper o fluxo rodoviário ou ferroviário. Um dos testes aqui testados nesta Dissertação tem como cenário um viaduto com o objectivo de testar se em situações de disseminação de informação de segurança ou de conforto é possível haver uma boa cobertura de comunicação entre os veículos. Quer-se verificar, também, se a troca de informação é feita de forma eficiente, analisando, para isso, os valores de PDR e RSSI, de forma a concluir se a diferença de alturas entre os veículos, e respectivas antenas, poderá adulterar ou diferenciar os resultados anteriormente testados. Desta forma, realizou-se este teste num viaduto de Aveiro em que um dos veículos ficou parado na berma da estrada no viaduto, exactamente por cima da estrada inferior, e um segundo veículo que passou sempre no mesmo sentido, a uma velocidade constante de 30 km/h (Figura 36). Ao longo de todo o teste, ambos os veículos trocavam pacotes de tamanho reduzido entre eles, como já foi referido anteriormente.

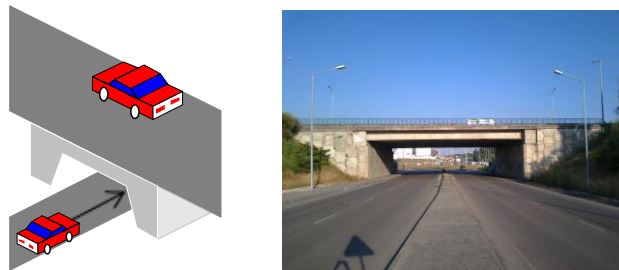


Figura 36 – Cenário Viaduto - Esquemático (à esquerda); Fotografia real do local (à direita)

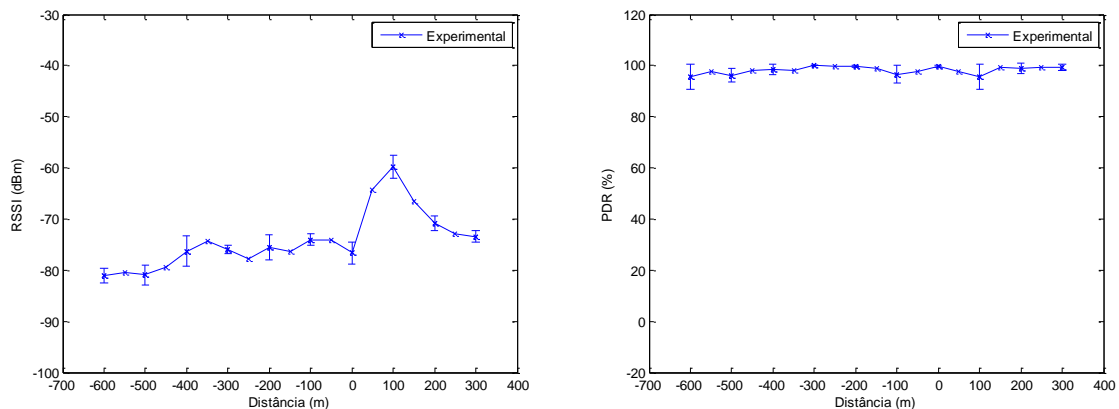


Figura 37 – RSSI e PDR num Viaduto

A Figura 37 mostra os vários valores de RSSI e de PDR em função da distância entre os veículos. Desta figura é possível verificar, numa primeira análise, que a distância entre os dois veículos não é levada ao limite máximo (cerca de 1000m), não conseguindo obter a informação se nestes cenários poderá haver alguma influência no alcance da comunicação, pois o veículo que se movimentava apenas podia circular 600 metros para um dos lados e 300 metros para o lado oposto, devido às condições e restrições da localização do viaduto testado.

De seguida, o que sobressai mais nos dados apresentados é o facto de haver um pico grande na qualidade de sinal recebido, mas que se dá apenas depois de o veículo passar por debaixo do viaduto. Esta ocorrência é explicada pelo facto de o veículo que passa por baixo do viaduto ter melhor linha de comunicação com o veículo parado só depois de este passar por completo o viaduto, pois o veículo em cima encontrava-se estacionado na berma da estrada, do lado oposto, o que faz com a melhoria significativa do sinal apenas se dê no segundo troço de estrada, onde existe claramente uma melhor linha de vista. Dos -600m aos 0m verifica-se que, efectivamente, a melhoria é pouco significativa, pois à medida que o veículo se vai aproximando do viaduto a linha de vista tende a piorar, mas é compensada também pelo facto de os veículos estarem mais próximos. Depois de passado o viaduto, as comunicações tendem a agravar novamente, seguindo a tendência da linha anterior, explicado com o aumento da distância.

Por fim, será pertinente comparar esta figura com a Figura 27, já apresentada na secção 4.3, em que a base do teste é exactamente a mesma. Dado que se concluiu que, pelo menos a baixas velocidades as comunicações não são influenciadas, é adequado fazer-se aqui uma breve comparação. A única modificação aqui presente, para o cenário a velocidades relativas, é que um dos veículos se encontra a uma menor velocidade, o segundo veículo encontra-se a uma cota mais elevada relativamente ao veículo em circulação e existe a própria estrutura do viaduto como obstáculo. Comparando ambas as figuras, é possível verificar que, de facto, neste cenário o pico apenas se dá depois dos 0m, ao contrário do teste das velocidades relativas em que o melhor sinal era no momento exacto da passagem entre os veículos e onde as comunicações sofriam melhorias mais cedo e de forma mais gradual. No entanto, comparando os valores dos -600m de ambos os cenários, no teste realizado no viaduto, os veículos conseguem obter maior potência de sinal. Este acontecimento é explicado apenas pelo facto de o teste não ter sido realizado em campo aberto, havendo mais reflexões no segundo teste.

Relativamente ao gráfico de PDR verifica-se que o cenário testado mostra que a entrega de pacotes nunca desce dos 95%, dentro das distâncias possíveis, o que é um sinal que um número muito pouco significativo de pacotes é perdido, ao contrário do que se esperava, pelo menos no momento exacto da passagem por debaixo do viaduto.

4.7 Transmissão de Vídeo

A transmissão de vídeo entre os diferentes veículos, quer seja para fins de entretenimento (passagem de filmes ou de músicas) ou de segurança (partilha da imagem capturada em tempo real da câmara de pára-brisas ou localização de veículos – 2.4.4 e 2.4.5), vai ser uma realidade com a implementação em massa das redes veiculares. No entanto, é necessário que o nosso equipamento seja testado neste tipo de cenários, verificando quais as suas capacidades e/ou limitações. Para tal, realizaram-se alguns testes em laboratório com a finalidade de se analisar a possibilidade de enviar vídeo em directo (mais aplicado aos cenários de ultrapassagens inteligentes). Por falta de tempo não chegaram a ser realizados testes no terreno, mas ficam aqui referidos alguns dos cenários que se pretendem testar num futuro próximo.

A primeira experiência realiza-se da seguinte forma: ambos os veículos circulam à mesma velocidade diferenciando, em cada teste, a distância fixa entre eles (Figura 38). Como

normalmente a disseminação de vídeo é feita a distâncias relativamente curtas, as distâncias escolhidas seriam de 25, 50, 150 e 250m. Por outro lado, o segundo teste pretende simular um cenário em que seja necessário um *relay* para a retransmissão da informação (Figura 39). Nesta experiência o objectivo seria verificar a influência do *relay* no encaminhamento do vídeo relativamente à qualidade de vídeo (pois a largura de banda é reduzida para metade), bem como concluir se o vídeo sofre atrasos significativos.

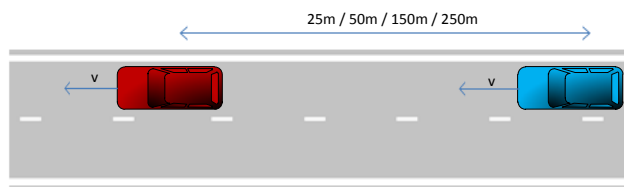


Figura 38 – Cenário Transmissão de Vídeo: distâncias fixas (Esquemático)

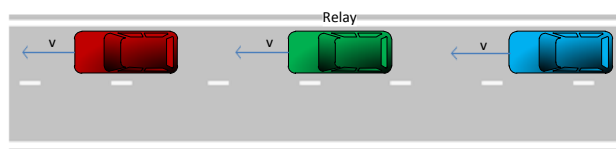


Figura 39 – Cenário Transmissão de Vídeo: *relay* (Esquemático)

Nos testes realizados em laboratório, numa primeira fase avaliou-se apenas o tempo de atraso e qualidade de vídeo com o programa VLC e tentou enviar-se dum computador para o outro os dois tipos de vídeo, sem qualquer *transcoding* (processamento do vídeo, levando naturalmente a algumas perdas, mas que o torna mais leve de enviar, diminuindo assim o atraso entre o cliente-servidor). Nos testes de AVI (*Audio Video Interleave*), o atraso era de cerca de 3.5s com uma óptima qualidade de vídeo (imagem e fluidez), sem qualquer perda. No caso do envio do vídeo gravado via câmara *web* e enviado em tempo real, a conclusão foi que o atraso entre o receptor e o transmissor era cerca de 5 segundos, o que tornava impossível esta aplicação em termos de ultrapassagens inteligentes, pois poderia ser fatal.

Deste modo, decidiu-se que a codificação/descodificação era fulcral na passagem de vídeo de um veículo para o outro. Porém, surgiu outra questão, que diz respeito a qual o *transcoding* usar. Existem vários tipos de *codecs* (codificadores/descodificadores) que conseguem fazer *transcodings* mais eficazmente que outros, mas também mais pesados relativamente à percentagem de utilização do processador. De todos os disponíveis no programa VLC, decidiu-se usar o mais leve, o MPEG-2 (*Moving Picture Experts Group*). No entanto, com o *transcoding* em tempo real, o atraso subiu para os 8 segundos, explicado pela exigência de processamento/utilização de CPU. Posto isto, no caso do envio de vídeo AVI, decidiu-se fazer o *transcoding* previamente e só depois enviar o ficheiro de vídeo já processado, diminuindo desta forma, o atraso de 3.5s para cerca de 2 segundos. No entanto, no caso do envio do vídeo gravado pela câmara, a mesma solução não podia ser implementada por razões óbvias.

Devido a estes resultados, como já foi explicado em 3.3.3, decidimos procurar outra solução, pois o desempenho verificado com o VLC, mesmo com quase todas as combinações

possíveis dos vários parâmetros, não correspondia aos nossos objectivos (para além de introduzir logo um atraso inerente de 500ms). Neste sentido, surgiu a plataforma GStreamer.

O nosso primeiro objectivo com o GStreamer foi conseguir medir o atraso real da transmissão de vídeo, desde que é capturada a imagem até esta chegar ao destino. No entanto, os programas existentes para medições de atraso apenas dão informação acerca do atraso na rede, não contando portanto, com o processo de codificação e de decodificação. A solução encontrada para obter este atraso de forma precisa foi reproduzir um contador com precisão ao milissegundo numa metade do ecrã no computador destino. De seguida, com uma câmara *web*, o computador fonte grava a imagem do contador que se encontra em reprodução e envia a imagem capturada para o primeiro PC, ficando assim num único ecrã, a imagem reproduzida e a imagem gravada e transmitida. Nesta comunicação os dois PCs encontravam-se ligados a duas placas, sendo a transmissão realizada à frequência de 5.875GHz.

Deste modo, procedemos à captura do ecrã de forma a obter um resultado semelhante ao da Figura 40. Como apenas uma captura é insuficiente para concluirmos o atraso efectivo, capturaram-se 10 imagens com o objectivo de se ter uma boa média de valores e conseguir-se apresentar um bom intervalo de confiança a 95%. O atraso de toda a transmissão (desde que é captura a imagem até aparecer no ecrã destino) é de (53.6 ± 10.8) ms. Um atraso desta natureza, a uma velocidade combinada de 200 km/h, dá um erro de percepção ao condutor de cerca de 3m (desprezável).

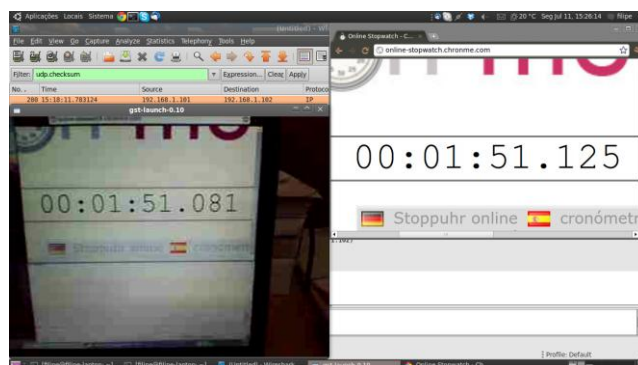


Figura 40 – Emissão de Vídeo: captura de ecrã

Como última nota, tem de se ter em atenção que os resultados aqui presentes foram realizados em laboratório e que a distâncias maiores o atraso será maior. Para se obter os resultados descritos na Figura 38 e na Figura 39 não se pode realizar o processo descrito acima. Porém, como já se tem acesso ao atraso total das comunicações, com uma sincronização precisa ao milissegundo dos relógios dos dois computadores, é possível verificar qual o atraso dos pacotes na rede, conseguindo-se obter assim o atraso introduzido pelo codificação/decodificação do vídeo (que se mantém constante).

4.8 Desempenho das redes veiculares com e sem infra-estruturas

Como já foi descrito no Capítulo 2, uma boa comunicação entre veículos em redes veiculares é dependente da densidade de veículos presente em cada situação. Em cenários de auto-estrada existe uma grande probabilidade que haja lacunas entre agregados, não permitindo a comunicação entre estes, excepto no caso de haver alguma infra-estrutura que permita o reencaminhamento das mensagens até ao destino. Deste modo, as RSUs melhoram a conectividade entre veículos, mas a instalação de toda uma infra-estrutura tem o seu custo e, por isso, é necessário calcular qual o número mínimo de RSUs, mantendo no entanto uma melhoria significativa no desempenho final. Estes testes têm como objectivo o estudo da implementação das RSUs em cenários de auto-estrada, sendo testados três tipos de situações: RSUs desligadas, ligadas e sem qualquer infra-estrutura. Em [25] mostra-se que, mesmo em hora de ponta, se a penetração de DSRC for menor que 35% vão existir muitas lacunas entre os veículos, isto é, bastantes falhas de comunicação. Ainda na mesma referência é simulado um cenário de uma auto-estrada em que existe trânsito em ambos os sentidos e que, sem RSUs, o *re-healing time* (atraso necessário para que um pacote chegue a um nó desconectado da rede) pode chegar aos 100 segundos, que é um valor impossível de se aceitar em aplicações de segurança, entre outras.

Os testes apresentados na Figura 43, Figura 41 e Figura 42 foram realizados numa estrada com cerca de 2km em linha recta e com pouco tráfego, sendo executados fora das horas de ponta. Por razões de segurança e de impossibilidade de realizar testes acima dos 50 km/h (velocidade máxima permitida), todos os cenários os veículos deslocam-se a esta velocidade, por isso, todos os resultados analíticos foram calculados tendo por base uma velocidade de 13.89m/s. As simulações realizadas tiveram em conta um alcance de 250m (devido às limitações do comprimento da estrada em linha recta disponível para testes), o que obrigou, na parte experimental, a usar-se uma potência de 4 dBm, ficando os veículos com um alcance próximo dos 300m.

No caso dos cenários das RSUs desligadas, existe uma panóplia de resultados experimentais que podem ser realizados. No entanto, decidimos fazer os três descritos em baixo (Figura 41):

- Cenário 1: O veículo fonte e o veículo destino encontram-se exactamente à mesma distância da RSU. Nesta configuração, a RSU deve melhorar o desempenho das comunicações entre os dois veículos, reduzindo a distância que os veículos terão de percorrer para que a mensagem seja entregue ao Destino;
- Cenário 2: Semelhante ao cenário anterior (os dois veículos continuam a 1000m de distância), com a diferença que, neste caso, a RSU encontra-se estrategicamente colocada num local que em nada melhora a comunicação entre os veículos, isto é, quando os veículos conseguem comunicar através da RSU, nesse mesmo instante os dois veículos começam a comunicar entre eles de forma directa (supondo um teste ideal, com velocidades constantes e distâncias

exactas), tornando-se num cenário “sem RSU”, já que esta não influenciará a comunicação entre os veículos;

- Cenário 3: Neste cenário, ambos os veículos encontram-se no mesmo sentido (mas a uma distância suficiente para que não haja comunicação directa entre eles) e existe uma RSU instalada afastada de ambos os veículos que terá como função receber a mensagem entregue pela Fonte e entregá-la ao Destino, quando este estiver ao alcance da RSU.

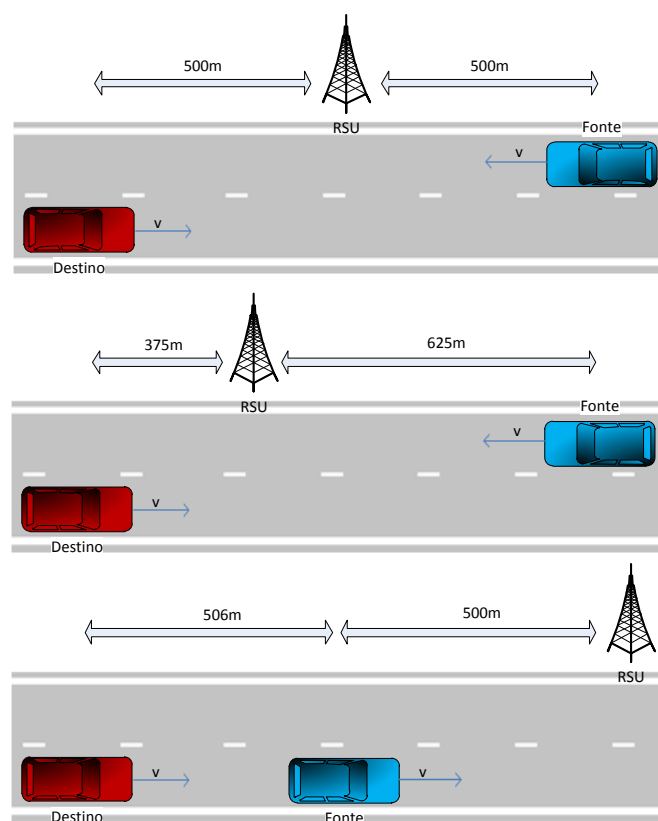


Figura 41 – Três cenários para RSUs desligadas (fonte: [46])

Nos cenários em que as RSUs se encontram ligadas entre si, realizaram-se os seguintes testes, de forma a observar qual a diferença no caso de existir um veículo isolado ou um agregado de veículos. As RSUs foram instaladas com antenas de 9dBi, possibilitando alcances maiores do que as utilizadas nos veículos (de 5dBi), de forma a haver comunicação entre elas. Em simulação, a ligação foi realizada através de Ethernet. Realizaram-se dois testes que são descritos a seguir (Figura 42).

- Cenário 1: Neste cenário, apenas existirá um veículo (Fonte) que irá enviar a primeira mensagem assim que se encontrar a meia distância entre as duas RSUs, em que a RSU1 será responsável por enviar a mensagem para a RSU2 (Destino). O

valor aqui medido é o tempo entre o envio da mensagem até esta passar pela RSU1 e chegar à RSU2;

- Cenário 2: Este cenário é bastante semelhante ao anterior, com a diferença que, ao invés de existir um único veículo, existe um agregado composto por dois veículos e no momento que este estiver no meio das duas RSUs, o veículo mais à esquerda deverá começar a enviar mensagens passando pelo veículo à direita e, posteriormente, verificar o tempo que demorou a primeira mensagem a chegar à RSU2. Este teste foi realizado para um CL (ver Figura 42) de 150 e 200 metros e depois, através de um modelo de probabilidade presente em [46], previram-se os restantes valores para as restantes distâncias. A razão de não se terem realizado testes experimentais para todas as distâncias simuladas deve-se ao facto de a diferença de distância entre os testes ser de aproximadamente 15 metros, o que se torna numa precisão inalcançável em testes reais.

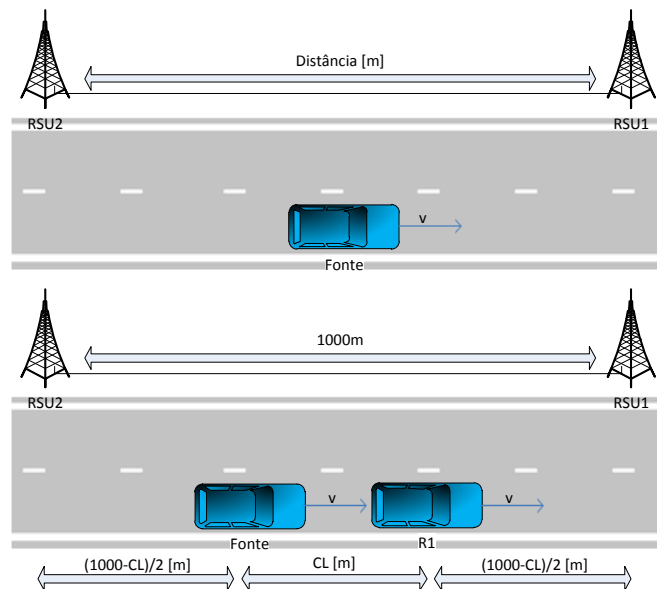


Figura 42 – Dois cenários para RSUs ligadas: veículo isolado e agregado de 2 veículos (fonte: [46])

Como última nota, para o caso do último cenário, o valor de C_L foi convertido através da densidade de veículos (veh/h), usando uma equação (10) presente em [46], onde $\lambda_s = \lambda_t/v$ [veh/m] corresponde ao parâmetro de uma distribuição exponencial do espaçamento entre veículos e λ_t [veh/s] corresponde ao parâmetro de uma distribuição exponencial do intervalo de tempo entre veículos. Sabendo o espaçamento entre veículos (S) e o respectivo alcance de comunicação (R) é possível calcular a probabilidade de existir uma interrupção da ligação com o veículo anterior (P_d) – equação (9). De seguida, tendo este valor, é possível calcular o C_L (tamanho do agregado) respectivo.

$$P_d = e^{-\lambda_s R} \quad (9)$$

$$C_L = \left(\frac{1}{P_d} - 1 \right) \times \left(\frac{1}{\lambda_s} - \frac{RP_d}{1 - P_d} \right) [m] \quad (10)$$

Nos cenários sem RSUs da Figura 43 foram testadas 4 situações distintas com o objectivo de se comparar as diversas situações de Melhor Caso e Pior Caso. Estas duas nomenclaturas têm como base a distância do veículo fonte e veículo destino, sendo que os valores de atraso são dependentes do início da contagem de cada pacote, podendo haver um atraso maior num cenário de Melhor Caso comparativamente a um de Pior Caso.

- Cenário 1 (Melhor Caso 1): O veículo fonte encontra-se a uma distância de 756m do veículo destino e inicia a troca de pacotes quando o veículo *relay* se encontra a uma distância superior a 250m (alcance de comunicação). O tempo é contabilizado desde que o veículo *relay* passa pelo veículo fonte até entregar o primeiro pacote ao destino;
- Cenário 2 (Melhor Caso 2): Idêntico ao cenário anterior, com a diferença que os veículos fonte e destino se encontram a 406m de distância;
- Cenário 3 (Pior Caso 1): O veículo destino e o veículo fonte encontram-se a 256m de distância entre eles, pelo que não conseguem comunicar entre eles por apenas 6 metros, necessitando de um *relay* para tal. O tempo aqui contabilizado é iniciado desde que o *relay* se encontra a 423m do veículo fonte até ser entregue o primeiro pacote ao destino;
- Cenário 4 (Pior Caso 2): Idêntico ao cenário anterior, com a única diferença que o início da contagem do tempo é iniciado quando o *relay* se encontra a 377m da fonte.

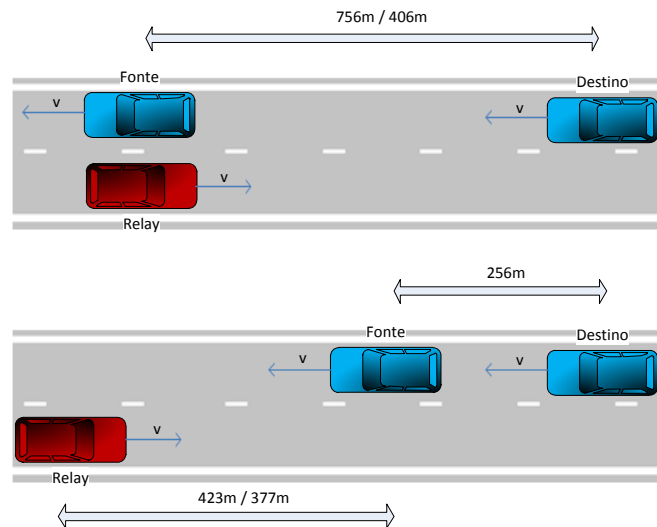


Figura 43 – Cenários sem RSUs: Best Case (esquema de cima) e Worst Case (esquema de baixo)

Os resultados que foram retirados dos vários cenários descritos encontram-se nas figuras em baixo. De notar que, embora apareçam resultados para diferentes valores na Figura 45 e Figura 46, apenas foram realizados testes para 3 distâncias, criando depois uma linha de tendência com os restantes valores a partir de modelos probabilísticos presentes em [46], até porque existem sempre limitações à estrada de testes, que é limitada em comprimento e em comunicação com linha de vista.

Os resultados experimentais, complementados por alguns resultados também simulados em NS-3, com a diferença de possuir um protocolo de encaminhamento OLSR activo (realizado no âmbito de uma Dissertação a decorrer em paralelo respectivo ao mesmo projecto), encontram-se na Figura 44, Figura 45 e Figura 46. A Figura 44 mostra o atraso dos três cenários das RSUs desligadas, a par com os modelos simulados. Nos cenários das RSUs ligadas, a Figura 45 (relativa ao cenário de um veículo isolado) representa o tempo de *re-healing* em função do espaçamento destas e a Figura 46 (relativa ao cenário de um agregado de 2 veículos) mostra o mesmo tempo, mas em função da densidade de veículos por hora. Por fim, na Figura 47 pode-se observar os resultados obtidos relativamente aos testes sem RSUs.

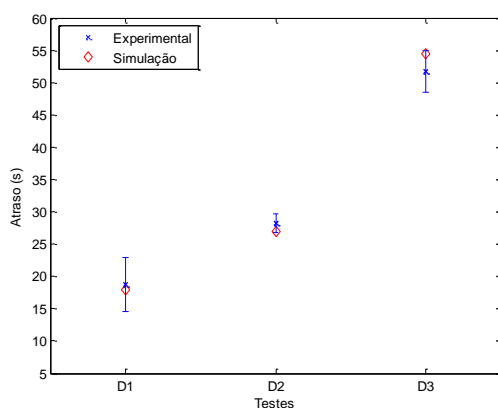


Figura 44 – RSUs desligadas (fonte: [46])

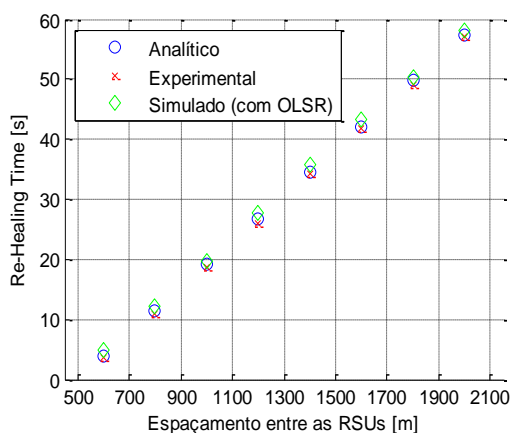


Figura 45 – RSUs ligadas com um veículo isolado (fonte: [46] - adaptado)

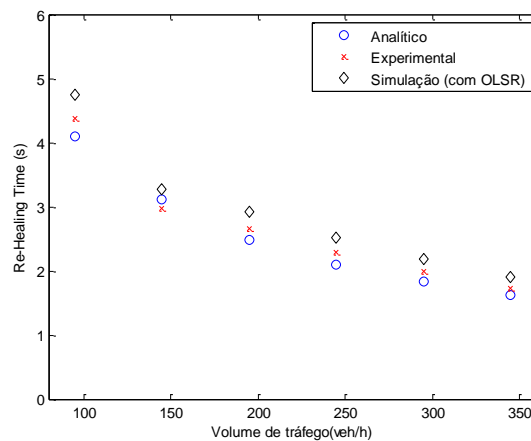


Figura 46 – RSUs ligadas com um agregado (fonte: [46] - adaptado)

Analisando a Figura 44, conclui-se que a posição estratégica das RSUs influencia significativamente os atrasos observados na disseminação das mensagens. Observando especificamente os cenários D1 e D2 (em que no primeiro cenário a RSU influencia a comunicação e, no segundo cenário, a posição desta não influencia) verifica-se que a diferença entre estes testes é cerca de 10 segundos. No caso D3, a mensagem ao ser guardada na RSU e enviada para o veículo destino demora mais de 50 segundos. Neste caso o tempo é elevado, mas tem de se ter em conta que se não houvesse nenhum veículo em sentido contrário que reencaminhasse a mensagem e a RSU não existisse, devido ao espaçamento dos veículos e ao seu alcance de comunicação, a mensagem nunca seria entregue. Falta lembrar que com uma distância maior de comunicação e velocidades maiores (e com tráfego nos dois sentidos), os valores presentes certamente sofriam bastantes melhorias.

Observa-se também que nos cenários conectados, o aumento do espaçamento entre as RSUs piora de forma linear o tempo de *re-healing*, no caso de um veículo isolado (Figura 45), e que o aumento da densidade de veículos/do agregado melhora o tempo de *re-healing* (Figura 46). Analisando estes testes como um todo é possível averiguar que mesmo com instalações densas de RSUs desligadas e os pacotes terem de ser entregues a uma distância maior que 1km, os atrasos nunca irão ser inferiores às dezenas de segundos. Por outro lado, com as RSUs interligadas é possível reduzir o valor para que este nunca seja superior a 5 segundos. Por fim, é possível afirmar que os modelos analíticos usados podem ser utilizados em cenários mais complexos por espelharem bem situações reais. Comparando estes resultados com a mesma simulação, mas com protocolos de encaminhamento, verifica-se que efectivamente o tempo de *re-healing* é ligeiramente maior (cerca de 1.5s) que os valores simulados sem qualquer protocolo. Esta explicação é dada pelo facto de o protocolo de encaminhamento ter de convergir (para ter conhecimentos dos nós vizinhos presentes no seu alcance) até começar a iniciar a entrega de pacotes.

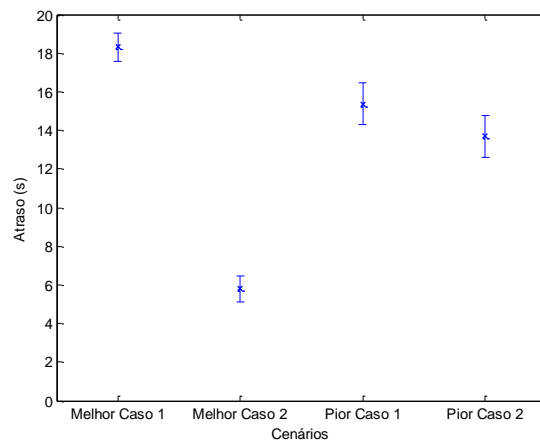


Figura 47 – Sem RSUs

Analisando os últimos resultados presentes na Figura 47, verifica-se que, em média, os valores de atraso dos cenários Melhor Caso são inferiores aos de Pior Caso. Como já foi referido na explicação do cenário no capítulo anterior, os nomes escolhidos apenas têm em conta a distância entre o veículo Fonte e Destino, pelo que o grande factor de variação dependerá da distância escolhida para o início da contagem até à entrega do pacote respectivo, alcance definido e velocidade dos veículos. No entanto, verifica-se que o tempo de entrega de pacotes é bastante superior sem RSUs do que com uma infra-estrutura instalada, pelo que se corrobora o facto de estas serem fundamentais para a disseminação das mensagens nas VANETs nestas situações.

Em termos gerais, quanto mais RSUs houver (se possível, ligadas), menores irão ser os tempos de entrega. Mas existe uma questão pertinente que tem de ser colocada: qual a relação melhoria das comunicações/custo mais equilibrada. Esta é a pergunta mais importante que se tem de responder, e talvez a mais difícil, pois em situações de baixa densidade de veículos, o número de RSUs terá que ser bastante elevado, tornando o custo de instalação insustentável. Mesmo introduzindo RSUs com um espaçamento de 2000m entre Aveiro e Porto (aproximadamente 78km), só neste troço teriam de ser instaladas 39 RSUs. Logo, todo o investimento tem de ser bem discutido e bem gerido. Para além desta questão, existem outras, não menos importantes, como o tipo de comunicação usado para interligar toda a infra-estrutura fixa. Existem algumas hipóteses como interligá-las com fibra óptica ou o acesso à banda larga através das comunicações celulares 3G (menor largura de banda que a fibra), onde ainda não existe uma cobertura de 100% na grande maioria dos países. Neste caso, a instalação das RSUs teria de ficar dependente de uma infra-estrutura já montada ou acrescer este custo à instalação. Por outro lado, existem outras tecnologias recentes e em crescimento, como a LTE ou a WiMAX, que podem ser usadas onde não existam as duas tecnologias descritas anteriores ou onde o custo da sua instalação poderá ser bastante elevado. Em particular, a tecnologia WiMax pode operar à frequência de 5.8GHz (frequência admitida para redes veiculares nos Estados Unidos da América) e ao usar este espectro tem-se a vantagem de usar maiores valores de potência (aumentando, desta forma, o alcance), mas com o inconveniente de ter que se pagar licenças para o seu uso [46].

4.9 Conclusões

Ao longo deste capítulo foram apresentados os cenários e os resultados de todos os testes realizados ao longo de toda a Dissertação, acompanhados de uma breve discussão.

Numa primeira fase foram apresentados alguns testes iniciais, onde se incluem os tempos de associação, taxas de transmissão e atrasos derivados dos múltiplos saltos entre os equipamentos. No primeiro teste concluiu-se que os tempos de associação estão na ordem das poucas dezenas de milissegundos, não oferecendo qualquer problema no momento de ligação a novas redes. Relativamente às taxas de transmissão, verificou-se que estas eram muito próximas do valor teórico/esperado, tendo-se concluído que o protocolo AODV não suporta múltiplas interfaces e que, mesmo com a criação de uma *bridge*, a taxa de transmissão é 16 vezes inferior. Por fim, dentro dos testes iniciais, verificou-se que o atraso derivado dos múltiplos saltos são desprezáveis (abaixo dos 20ms), até três saltos.

Acerca dos resultados captados em testes reais, verificou-se que o alcance máximo de comunicação é de aproximadamente 1km, tornando esta distância de comunicação suficiente para diminuir as lacunas que poderão existir entre os veículos. Observou-se também que, até uma velocidade relativa de 100km/h, os valores de RSSI e PDR não são dependentes da velocidade.

Em relação aos testes em cruzamentos, observou-se que, mesmo em cruzamentos diferentes, as distâncias de comunicação são bastante semelhantes, cerca de 100m, sendo esta suficiente para que haja tempo suficiente para trocas de informações de segurança ou a implementação de semáforos virtuais. No entanto, como era expectável, as comunicações em intersecções reduzem de forma significativa o alcance de comunicação entre os veículos (cerca de 90%). O veredicto aqui presente também é bastante importante quando forem desenvolvidos modelos analíticos para intersecções.

Relativamente aos resultados nos túneis verificou-se que existe uma melhoria das comunicações, devido às reflexões nas paredes. No teste realizado no viaduto observou-se que, em situações de necessidade de disseminação para estradas com diferentes cotas e mesmo com o obstáculo do próprio betão usado na construção de viadutos, a troca de mensagens não fica comprometida, obtendo-se sempre um grau elevado de entrega de pacotes, embora a potência de sinal possa ser mais forte para um dos lados do viaduto, como foi discutido.

Os resultados da transmissão de vídeo permitiram concluir que o envio de vídeo através da plataforma GStreamer tem um óptimo desempenho, conseguindo um atraso desprezável de 53.6ms desde que é captada a imagem até esta ser entregue ao destino.

Por fim, foi possível concluir que a instalação de elementos da infra-estrutura ao longo da estrada melhora o desempenho das comunicações em redes veiculares. Esta melhoria é ainda mais significativa quando estas se encontram ligadas.

5. Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho desta Dissertação consistiu no desenvolvimento de aplicações para a realização de várias experiências reais das VANETs, assim como na própria realização dos testes e análise dos resultados. Neste capítulo são apresentadas as conclusões mais importantes relativas ao trabalho desenvolvido e são referidas algumas sugestões para linhas futuras de investigação.

O grupo de trabalho do Instituto de Telecomunicação de Aveiro implementou a norma IEEE 802.11p ao nível físico, usando para tal o *driver* de código aberto ath5k para Linux, sendo possível testar em vários cenários o seu desempenho, com e sem linha de vista, tendo-se acesso a uma vasta gama de resultados e, conseqüentemente, a informação bastante importante na área das redes veiculares. Para além dos trabalhos práticos, foi também desenvolvido um modelo de canal estatístico de forma a complementar os resultados e mostrou-se que os resultados simulados acompanham os resultados empiricamente obtidos.

De uma forma geral, os resultados obtidos indicam-nos que as comunicações em linha de vista podem ter um alcance de 1000m e que, nos casos sem linha de vista (tendo como obstáculos edifícios ou paredes), a distância de comunicação não vai além dos 100m, tendo por base três tipos de cruzamentos, distintos uns dos outros. Estes resultados mostram que a probabilidade de comunicação em auto-estradas é bastante elevada, visto que um alcance de 1000m é o suficiente para fazer diminuir muitas das possíveis lacunas que possam existir entre agregados, aumentando assim a fiabilidade das ligações. Os modelos usados para a linha de vista vão de encontro aos resultados empíricos, pelo que podem ser usados com confiança no futuro por espelharem o que se passa em situações reais. Em situações NLOS, o alcance de comunicação permite que qualquer informação de segurança crítica possa ser dada com a devida antecedência, oferecendo um tempo significativo de reacção ao condutor. Contudo, ainda não existe um bom modelo que consiga modular e simular cenários de comunicações veiculares em que haja obstáculos (como edifícios, paredes, montanhas, entre outros), ao contrário do que se verificou com os cenários em LOS.

No cenário de comunicação em túneis, verificou-se que existe uma melhoria nas comunicações quando ambos os veículos se encontram dentro dos túneis testados. No entanto, estas conclusões têm apenas em consideração dois veículos, pois numa situação de maior densidade, a conclusão poderá ser bastante distinta. Também se deve ter em conta que a comunicação de um veículo fora do túnel para um que esteja já no seu interior não pode ser feita apenas através de comunicação V2V (pelo menos de uma forma rápida), o que levanta a questão sobre a instalação futura de uma infra-estrutura de forma a possibilitar, em caso de necessidade, o envio de informação entre o interior dos túneis e o exterior. No cenário realizado no viaduto de Aveiro mostrou-se que a troca de mensagens não fica comprometida, mesmo a diferentes cotas entre os veículos, entregando-se quase sempre a totalidade dos pacotes.

Dos testes realizados da transmissão de vídeo é possível concluir que a plataforma GStreamer é uma boa solução para a emissão de vídeo e que, tendo apenas um atraso de cerca de 50ms entre a fonte e o destino, este *software* pode ser utilizado no cenário das ultrapassagens inteligentes com bons resultados.

Relativamente aos cenários com e sem RSUs (com estas ligadas e desligadas), conclui-se que o uso de RSUs ligadas tem uma melhoria significativa no desempenho das comunicações veiculares (passagem das dezenas de segundo para um máximo de 5 segundos). Terá de haver, no entanto, uma boa gestão e estudos mais aprofundados de forma a haver uma boa aplicação de capital nas infra-estruturas referidas (relativamente ao espaçamento entre elas), bem como uma boa decisão de como irão ser ligadas, por várias tecnologias com ou sem fios.

Por último, poderá concluir-se que, ao nível da camada física, o *hardware/software* está apto para ser instalado na *testbed* do Porto e começar a testar, em grande escala, o desempenho das comunicações V2V.

Depois do trabalho desenvolvido ao longo de toda a Dissertação e analisando todos os trabalhos que foram ou estão a ser desenvolvidos em paralelo, existem ainda várias lacunas nas redes veiculares que têm de ser investigadas e desenvolvidas, bem como alguns problemas que, até ao momento, ainda não se encontram resolvidos.

Um dos campos ainda muito pouco desenvolvido, e talvez um dos mais importantes na comunicação veicular, é a segurança da rede, pois este tema irá ter um grande impacto no progresso de toda a investigação aplicacional das redes veiculares. É uma realidade que a segurança e a privacidade dos dados são pontos fulcrais em qualquer comunicação, e toda a implementação irá ter repercussões nas comunicações, introduzindo algum atraso, devido à autenticação e troca de chaves necessária em todas as transmissões. Num futuro próximo, com a receptividade da tecnologia e crescimento das redes veiculares, um maior número de informação vai ser trocada, pondo cada vez mais em risco a informação dos utilizadores e as próprias redes. Consequentemente, é necessário propor soluções inovadoras de segurança entre os intervenientes, proporcionando confiança aos utilizadores. O processo de reautenticação também deverá ser estudado, pois com a alta mobilidade da rede este processo terá que ser facilitado.

Um problema bastante complexo nas redes veiculares é não existir ainda nenhum padrão para a atribuição de endereços IPs em redes *ad hoc*, que deveria ser feito de forma automática e de forma distribuída. O padrão a ser usado no futuro terá que ter em consideração dois aspectos fundamentais: configuração de endereços IP e gestão de toda a mobilidade. Sem uma boa e rápida distribuição de IPs, a qualidade do serviço pode ficar ameaçada.

Uma área já muito estudada é relativa ao tema dos protocolos de encaminhamento. No entanto, ainda não foi criado um protocolo de encaminhamento geográfico que se consiga adaptar aos ambientes característicos e dinâmicos das VANETs. O estudo dos protocolos terá que ser uma prioridade de investigação nos próximos anos.

Um ponto fulcral, não só nas redes veiculares, mas em todo o Sistema de Transportes Inteligentes, é que está previsto, como já foi dito no primeiro capítulo, que os emissores presentes neste Sistema maximizem a utilização do espectro, controlando para tal a potência de emissão reduzindo-a a um nível mínimo possível, tornado o espectro eficiente e diminuindo desta forma as interferências prejudiciais. Neste sentido, seria interessante criar um mecanismo que prevenisse estes casos, diminuindo o raio de comunicação, e de avisar, por nós vizinhos, que o alcance deverá aumentar para determinada situação, criando assim uma maior organização na rede.

Relativamente à transmissão de vídeo, para além dos cenários já descritos no capítulo anterior, seria relevante fazer a emissão de vídeo em que a própria placa faria a codificação do vídeo, de modo a ser testado o pior caso relativo ao tempo de processamento. A criação de um *buffer* para trabalhos futuros seria importante e útil para alguns cenários a testar-se, implementando-se, desta forma, um mecanismo *store-carry-forward*.

Por fim, a análise das diferenças de vários testes realizados com TCP (*Transmission Control Protocol*) e com UDP, a realização de testes em larga escala e testes com a implementação do MAC IEEE 802.11p estão também em vista para serem executados num futuro próximo.

Bibliografia¹

1. *DRIVE-IN - Distributed Routing and Infotainment through VEhicular Inter-Networking*. [Online] [Citação: 7 de Fevereiro de 2011.] <http://drive-in.cmuportugal.org/>.
2. *DRIVE-IN: Distributed Routing and Infotainment through VEhicular Inter-Networking*. **Barros, João, et al.**
3. **Cardote, André e Martin, Theodore.** Evaluation and Improvement of the Accuracy of VANET Simulation. 29 de Abril de 2011. Project Final Report of the discipline Wireless Networks at Carnegie Mellon University.
4. **NDrive.** *NDrive*. [Online] [Citação: 8 de Fevereiro de 2011.] <http://www.ndrive.com/>.
5. **IMTT.** *IMTT - Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres*. [Online] [Citação: 8 de Fevereiro de 2011.] <http://www.imtt.pt/>.
6. **RádiTaxis.** *RádiTaxis*. [Online] [Citação: 20 de Março de 2011.] <http://www.raditaxis.pt>.
7. **TomTom International BV.** *TomTom*. [Online] [Citação: 26 de Maio de 2011.] <http://www.tomtom.com/>.
8. *System performance and user response under real-time information in a congested traffic corridor*. **Mahmassani, HS e Jayakrishnan, R.** Transportation research. Part A: general, 1991, Vols. 25, n.º 5.
9. Car 2 Car Communication Consortium Manifesto (Version 1.1). *Car 2 Car - Communication Consortium*. [Online] 28 de Agosto de 2007. [Citação: 12 de Fevereiro de 2011.] <http://www.car-to-car.org>.
10. *Aktiv: Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr*. [Online] [Citação: 21 de Março de 2011.] <http://www.aktiv-online.org>.
11. Prevent project. *PREVENT*. [Online] [Citação: 21 de Março de 2011.] <http://www.prevent-ip.org>.
12. *SAFESPOT (Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety)*. [Online] [Citação: 8 de Junho de 2011.] <http://www.safespot-eu.org/>.
13. **LIACC: Laboratório de Inteligência Artificial e Ciência de Computadores.** *DIVERT – Development of Inter-VEhicular Reliable Telematics*. [Online] [Citação: 29 de Junho de 2011.] <http://divert.ncc.up.pt/>.
14. Intelligent Transport Systems. *ETSI - World Class Standards*. [Online] [Citação: 1 de Março de 2011.] <http://www.etsi.org/>.
15. *Sensor networks on the road: the promises and challenges of vehicular ad hoc networks and vehicular grids*. **Nekovee, M.** Workshop on Ubiquitous Computing and e-Research, Edinburgh, UK : s.n., Maio de 2005.
16. *Challenges of intervehicle ad hoc networks*. **Blum, J., Eskandarian, A. e Hoffmman, L.** IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, Dezembro de 2004.
17. **Kihl, Maria.** Vehicular Network Applications and Services. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications*. Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 2.

¹ De acordo com o estilo ISO 690

18. **Moustafa, Hassnaa, Senouci, Sidi Mohammed e Jerbi, Moez.** Introduction to Vehicular Networks. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications*. Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 1.
19. *Commission decision of 5 August 2008 on the harmonised use of radio spectrum in the 5875-5905 MHz frequency band for safety-related applications of Intelligent Transport Systems (ITS)*. Bruxelas : s.n., 15 de Agosto de 2008, Official Journal of the European Union.
20. *CAR-2-X Communication for Safety and Infotainment*. **Festag, Dr. Andreas, et al.** Safety and Security, 2008, NEC Technical Journal, Vols. 3, n.º 1.
21. *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*. **Jiang, Daniel e Delgrossi, Luca.** Vehicular Technology Conference (VTC 2008), Singapore : s.n., Maio de 2008, pp. 2036-2040. Mercedes-Benz Research & Development North America, Inc..
22. *IEEE 802.11p Performance Evaluation and Protocol Enhancement*. **Wang, Yi, et al.** 2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Columbus, OH, USA : s.n., 22-24 de Setembro de 2008, pp. 317-322.
23. *Performance Evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs*. **Bianchi, G., Fratta, L. e Oliveri, M.** Outubro de 1996.
24. *Performance evaluation of the IEEE 802.11p WAVE communication standard*. **Eichler, S.** Baltimore, USA : s.n., Setembro de 2007.
25. *Routing in Sparse Vehicular Ad Hoc Wireless Networks*. **Wisitpongphan, Nawaporn, et al.** Outubro de 2007, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vols. 25, n.º 8, pp. 1538-1556.
26. *Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways*. **Chen, Z. D., Kung, H. e Vlah, D.** MobiHoc '01: Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, New York, NY, USA : s.n., 2001, ACM, pp. 247-250.
27. *An efficient fully ad-hoc multi-hop broadcast protocol for inter-vehicular communication systems*. **Korkmaz, G., Ekici, E. e Ozguner, F.** IEEE International Conf. on Commun. (ICC), Istanbul, Turkey : s.n., Junho de 2006.
28. *Urban Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicle Communication Systems*. **Korkmaz, G., et al.** ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad hoc Networks (VANET 2004), Philadelphia, USA : s.n., Outubro de 2004, pp. 76-85.
29. *Vadd: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks*. **Zhao, J. e Cao, G.** IEEE Conf. on Computer Commun. (INFO-COM), 2006.
30. *What is the Best Achievable QoS for Unicast Routing in VANET?* **Boban, Mate, Misek, Geoff e Tonguz, Ozan K.**
31. *Facilitating Real-time Applications in VANETs through Fast Address Auto-configuration*. **Fazio, Maria, et al.** 2007.
32. *Ip address assignment in mobile ad hoc*. **Mohsin, M. e Prakash, R.** IEEE MILCOM, Setembro de 2002.
33. *MANETconf: Configuration of Hosts in a Mobile Ad Hoc Network*. **Nesargi, S. e Prakash, R.** INFOCOM 2002, New York : s.n., Junho de 2002.

34. *Weak duplicate address detection in mobile ad hoc networks.* **Vaidya, N. H.** ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking, Boston, Massachusetts : s.n., Junho de 2002.
35. *PACMAN: Passive Autoconfiguration for Mobile Ad Hoc.* **Weniger, K.** Março de 2005, IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vols. 23, n.º 3.
36. **Tonguz, O. K. e Ferrari, G.** *Ad Hoc Wireless Networks: A Communication-Theoretic Perspective.* New York : John Wiley & Sons, 2006.
37. *On the Broadcast Storm Problem in Ad Hoc Wireless Network.* **Wisitpongphan, N., et al.** IEEE Wireless Communications, Dezembro de 2007.
38. *Broadcast reception rates and effects of priority access in 802.11-based vehicular ad-hoc networks.* **Torrent-Moreno, M., Jiang, D. e Hartenstein, H.** ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004), Philadelphia, PA : s.n., Outubro de 2004.
39. **Qian, Yi e Moayeri, Nader.** Medium Access Control Protocols for Vehicular Networks. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications.* Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 3.
40. **Conti, Andrea, et al.** Heterogeneous Wireless Communications for Vehicular Networks. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications.* Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 4.
41. *Data Aggregation and Roadside Unit Placement for a VANET Traffic Information System.* **Lochert, C., et al.** 5th ACM Int'l Workshop on Vehicular Internetworking (VANET 2008), San Francisco, USA : s.n., Setembro de 2008, pp. 58-65.
42. *Using RSUs as Delegates for Pervasive Access to Services in Vehicle Ad Hoc Networks.* **Mershad, K. e Artail, H.** 17th IEEE International Conference on Telecommunications (ICT 2010), Doha, Qatar : s.n., Abril de 2010.
43. *Optimal Placement of Gateways in Vehicular Networks.* **Li, Pan, et al.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, Novembro de 2007, Vols. 56, n.º 6, pp. 3421-3430.
44. *Analysis of Access and Connectivity Probabilities in Infrastructure-Based Vehicular Relay Networks.* **Ng, Seh Chun, et al.** IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2010, pp. 1-6.
45. *On the Performance of Sparse Vehicular Networks with Road Side Units.* **Reis, A. B., Sargento, S. e Tonguz, O. K.** Pittsburgh, PA, USA e Aveiro : s.n.
46. *Infrastructure Support in Sparse Vehicular Ad Hoc Networks.* **Reis, André B., et al.** Pittsburgh, PA, USA : s.n., 2011.
47. *Node connectivity in vehicular ad hoc networks with structured mobility.* **Ho, I. H. H., et al.** LCN '07: Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, Washington, DC, USA : s.n., 2007, IEEE Computer Society, pp. 635-642.
48. *Role-Based Multicast in Highly Mobile but Sparsely Connected Ad Hoc Networks.* **Briesemeister, L. e Hommel, G.** First Annual Workshop on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHOC), Boston, MA, USA : s.n., Agosto de 2000.
49. *Sending Messages to Mobile Users in Disconnected Ad hoc Wireless Networks.* **Li, Q. e Rus, D.** Sixth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), Boston, MA, USA : s.n., Agosto de 2000.

50. *Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks*. **Grossglauser, M. e Tse, D.** Infocom 2001, Anchorage, AK, USA : s.n., Abril de 2001.
51. **Ros, Francisco J., et al.** Routing in Vehicular Networks. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications*. Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 5.
52. **Ducourthial, Bertrand e Khaled, Yacine.** Routing in Vehicular Networks: A User's Perspective. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications*. Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 6.
53. *Comparing AODV and OLSR Routing Protocols*. **Huhtonen, Aleksandr.**
54. *Optimized Link State Protocol for Ad Hoc Networks*. **Jacquet, P., et al.** IEEE INMIC Pakistan, 2001.
55. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. **Clausen, T. e Jacquet, P.** IETF Network Working Group, Outubro de 2003.
56. *olsrd. an adhoc wireless mesh routing daemon*. [Online] 0.5.6-r8, 10 de Janeiro de 2010. [Citação: 25 de Maio de 2011.] <http://www.olsr.org/>.
57. *Performance Comparison of AODV and OLSR in VANETs Urban Environments under Realistic Mobility Patterns*. **Haerri, Jérôme, Filali, Fethi e Bonnet, Christian.** Sophia Antipolis, France : s.n.
58. *A Cautionary View of Mobility and Connectivity Modeling in Vehicular Ad-Hoc Networks*. **Conceição, Hugo, Ferreira, Michel e Barros, João.** 2009.
59. *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*. **Johnson, D. e Maltz, D.** Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, 1996, pp. 153-179.
60. *On the Connection Availability between Relay Nodes in a VANET*. **Cardote, André, Sargento, Susana e Steenkiste, Peter.** IEEE Globecom 2010 Workshop on Heterogeneous, Multi-hop Wireless and Mobile Networks, 2010, pp. 181-185.
61. *Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety*. **Biswas, S., Tatchikou, R. e Dion, F.** IEEE Communication Magazine, 2006.
62. **Fundação Francisco Manuel dos Santos.** Pordata - Base de Dados Portugal Contemporâneo. [Online] [Citação: 6 de Junho de 2011.] <http://www.pordata.pt/>.
63. *Optimized dissemination of alarm messages in vehicular ad-hoc networks (VANET)*. **Benslimane, A.** 7th IEEE International Conference on High Speed Networks and Multimedia Communications, Toulouse, France : s.n., 2004.
64. *Disseminating messages among highly mobile hosts based on inter-vehicle communication*. **Briesemeister, L., Schäfers, L. e Hommel, G.** IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Dearborn, MI : s.n., 2000.
65. *Performance evaluation of stored geocast*. **Maihöfer, C., et al.** IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Orlando, FL : s.n., 2003.
66. **Festag, Andreas, et al.** Geocast in Vehicular Networks. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications*. Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 14.
67. *Time-stable geocast for ad hoc networks and its application with virtual warning signs*. **Maihöfer, C. e Eberhardt, R.** Computer Communications, 2004.

68. *A survey of geocast routing protocols*. **Maihöfer, C.** IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004.
69. *Design and evaluation of two Geocast protocols for vehicular ad-hoc networks*. **Kihl, M., Sichitiu, M. e Joshi, H. P.** 2008, Journal of Internet Engineering.
70. *Wireless sensor network based adaptive vehicle navigation in multihop-relay WiMAX networks*. **Chang, B-J., Huang, B-J. e Liang, Y-H.** 22nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Okinawa, Japan : s.n., 2008.
71. *Information dissemination in self-organizing intervehicle networks*. **Wischhof, L., Ebner, A. e Rohling, H.** IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005 : s.n.
72. *Traffic view: Traffic data dissemination using car-to-car communication*. **Nadeem, T., et al.** ACM Mobile Computing and Communications Review, 2004 : s.n.
73. *Specification and performance evaluation of two zone dissemination protocols for vehicular ad-hoc networks*. **Bronsted, J. e Kristensen, L. M.** 39th Annual Simulation Symposium, Huntsville, KY : s.n., 2006.
74. *Design and practical evaluation of an intersection assistant in real-world testes*. **Benmimoun, A., Chen, J. e Suzuki, T.** IEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey : s.n., 2007.
75. *Self-Organized Traffic Control*. **Ferreira, Michel, et al.** VANET'10, Chicago, Illinois, USA : s.n., 24 de Setembro de 2010, pp. 85-89.
76. *Multiplayer games over Vehicular Ad Hoc Networks: A new application*. **Tonguz, Ozan K. e Boban, Mate.** Pittsburgh, PA, USA : s.n., 2010, Ad Hoc Networks, Vol. 8, pp. 531-543.
77. *The See-Through System: A VANET-Enabled Assistant for Overtaking Maneuvers*. **Olaverri-Monreal, Cristina, et al.** 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, University of California, San Diego, CA, USA : s.n., 21-24 de Junho de 2010, pp. 123-128.
78. *Security Analysis of Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*. **Samara, Ghassan, Al-Salihy, Wafaa A. H. e Sures, R.** 2010 Second International Conference on Network Applications, Protocols and Services, 2010, pp. 55-60.
79. *Vehicle Behavior Analysis to Enhance Security in VANETs*. **Schmidt, Robert K., et al.**
80. *Real-World VANET Security Protocol Performance*. **Haas, Jason J., Hu, Yih-Chun e Laberteaux, Kenneth P.**
81. *Efficient coordination and transmission of data for cooperative vehicular safety applications*. **Robinson, C. L., et al.** VANET '06: Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks, New York, NY, USA : s.n., 2006, ACM, pp. 10-19.
82. **Rappaport, T.** *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ, EUA : Prentice Hall PTR, 2ª Edição, 2001.
83. *Cabernet: vehicular content delivery using wifi*. **Eriksson, J., Balakrishnan, H. e Madden, S.** MobiCom '08: Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking, New York, NY, USA : s.n., 2008, ACM, pp. 199-210.
84. *Performance evaluation of suvnet with real-time traffic data*. **Huang, H.-Y., et al.** Vehicular Technology, Novembro de 2007, IEEE Transactions on, pp. 3381-3396.
85. *Cartel: a distributed mobile sensor computing system*. **Hull, B., et al.** SenSys '06: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, New York, NY, USA : s.n., 2006, ACM, pp. 125-138.

86. *C-vet the ucla campus vehicular testbed: Integration of vanet and mesh networks.* **Cesana, M., Fratta, L. e Gerla, M.** Wireless Conference (European Wireless 2010), 2010.
87. **OpenWrt.** *OpenWrt - Wireless Freedom.* [Online] [Citação: 3 de Maio de 2011.] <https://openwrt.org/>.
88. *Car-to-car radio channel measurements at 5 GHz: Pathloss, power-delay profile, and delay-doppler spectrum.* **Paier, A., Karedal, J. e Czink, N.** Proc. 4th Int. Symp. on Wireless Communication Systems, Trondheim, Norway : s.n., 2007, ISWCS '07.
89. *Vehicle channel models for the 5-ghz band.* **Sen, I. e Matolak, D.** Intelligent Transportation Systems, Junho de 2008, IEEE Transactions on, pp. 235-245.
90. *A geometry-based stochastic mimo model for vehicle-to-vehicle communications.* **Karedal, J., et al.** Wireless Communications, Julho de 2009, IEEE Transactions on.
91. *A new inter-vehicle communications (icv) channel model.* **Maurer, J., et al.** VTC2004-Fall: Vehicular Technology Conference, Setembro de 2004, 2004 IEEE 60th, Vol. 1, pp. 9-13.
92. *Lncs 6596 - real-world measurements of non-line-of-sight reception quality for 5.9GHz IEEE 802.11p at intersections.* **Mangel, T., et al.** 3rd International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars), Oberpfaffenhofen-Wessling, Munich, Germany : s.n., Fevereiro de 2011, pp. 1-14.
93. *Lncs 6596 - degradation of communication range in vanets caused by interference 2.0 - real-world experiment.* **Schmidt, R. K., et al.** PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, Vol. 32, pp. 224-234.
94. *NoW: Network on Wheels.* [Online] [Citação: 8 de Junho de 2011.] <http://www.network-on-wheels.de/>.
95. **NEC.** *NEC - Car2X Communication SDK.* [Online] [Citação: 8 de Junho de 2011.] <http://c2x-sdk.neclab.eu/>.
96. *COOPERS - Co-operative Systems for Intelligent Road Safety.* [Online] [Citação: 8 de Junho de 2011.] <http://www.coopers-ip.eu/>.
97. GeoNet Project. *GeoNet.* [Online] [Citação: 8 de Junho de 2011.] <http://www.geonet-project.eu/>.
98. **Wakikawa, Ryuji.** Mobile Ad Hoc NEMO. [autor do livro] Hassnaa Moustafa e Yan Zhang. *Vehicular Networks - Techniques, Standards, and Applications.* Broken Sound Parkway NW : CRC Press, 2009, 11.
99. **PC Engines.** ALIX.2 / ALIX.3 series (system boards). 2007. Datasheet.
100. **Unex.** DCMA-86P2: Wifi mini-PCI module for 802.11p/DSRC application, AR5414A-B2B. 2010. Datasheet.
101. **L-com.** HyperLink 2.4 GHz to 2.5GHz / 5.1 GHz to 5.9GHz Dual Band Desktop Antenna with Magnetic Base (Model: HG2458MGRD). Datasheet.
102. **Wifi-antennas.** 5dBi 2.4GHz Omni Antenna - RP SMA. *Wifi-antennas.* [Online] [Citação: 15 de Abril de 2011.] <http://www.wifi-antennas.co.uk/>.
103. **Debian.** Debian. [Online] Squeeze. [Citação: 28 de Janeiro de 2011.] <http://www.debian.org/>.
104. **Linux.** Linux Wireless. *ath5k.* [Online] [Citação: 11 de Abril de 2011.] <http://linuxwireless.org/>.

105. **DeltaShadow.company.** *CAR blueprints*. [Online] [Citação: 17 de Maio de 2011.] <http://carblueprints.info/>.
106. **Wireshark Foundation.** *Wireshark*. [Online] 1.6.0. [Citação: 17 de Fevereiro de 2011.] <http://www.wireshark.org/>.
107. **Schneider, Adam.** *GPS Visualizer*. [Online] [Citação: 17 de Fevereiro de 2011.] <http://www.gpsvisualizer.com/>.
108. **The MathWorks, Inc.** *MATLAB*. [Online] 7.11.0.584 (R2010b), 16 de Agosto de 2010. [Citação: 16 de Junho de 2011.] <http://www.mathworks.com/>.
109. **Google.** *Google Earth*. [Online] 6.0.3.2197, 17 de Maio de 2011. [Citação: 25 de Fevereiro de 2011.] <http://earth.google.com/>.
110. VideoLAN Organization. *VLC media player*. [Online] 1.1.10. [Citação: 4 de Junho de 2011.] <http://www.videolan.org/>.
111. *gststreamer - open source multimedia framework*. [Online] 0.10.35. [Citação: 28 de Junho de 2011.] <http://gststreamer.freedesktop.org/>.
112. *gpsd - a GPS service daemon*. [Online] 2.95, 13 de Julho de 2010. [Citação: 18 de Maio de 2011.] <http://gpsd.berlios.de/>.
113. The ns-3 network simulator. [Online] 3.10, Janeiro de 2011. [Citação: 17 de Junho de 2011.] <http://www.nsnam.org/>.
114. SourceForge. *Iperf*. [Online] 2.0.3, 18 de Março de 2008. [Citação: 6 de Abril de 2011.] <http://iperf.sourceforge.net/>.
115. **Saunders, S. R.** *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. s.l. : John Wiley & Sons, Setembro 2009.